



Sónia Marisa Mendes Pereira

Licenciada em Engenharia Civil

Estudo do Comportamento Estrutural de Fachadas em Vidro

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientador: Professor Doutor Filipe Amarante dos Santos
FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Rodrigo Gonçalves

Arguente(s): Prof. Doutor João Rocha de Almeida

Vogal(ais): Prof. Doutor Filipe Amarante dos Santos



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março 2012

‘Copyright’ Sónia Marisa Mendes Pereira, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Este espaço é dedicado às pessoas que contribuíram para a conclusão desta etapa marcante da minha vida.

Em primeiro lugar, quero agradecer ao Professor Filipe Santos por ter aceite orientar esta dissertação e por ter proposto um tema bastante interessante. Agradeço também pelo conhecimento que me transmitiu para a execução deste trabalho e pela sua disponibilidade e compreensão em todos os momentos.

A algumas pessoas amigas, quero agradecer pela motivação e apoio que sempre prestaram e pelos momentos memoráveis de companheirismo que proporcionaram ao longo deste período.

E por fim, mas não menos importante, um agradecimento muito especial aos meus pais, pelo seu incentivo e carinho nos momentos mais difíceis, porque sem eles este sonho não era possível.

A todos, o meu sincero obrigado.

Resumo

Esta dissertação estuda o comportamento do vidro como elemento estrutural, utilizando como caso de estudo, a fachada do Teatro de Camões, em Lisboa.

A análise estrutural da fachada foi realizada através de um programa de elementos finitos (SAP 2000), onde foi dada particular relevância à acção do vento.

O modelo de elementos finitos respeita a geometria e as características estruturais da fachada.

Posteriormente, foi feito um estudo paramétrico considerando diferentes tipologias estruturais, as quais foram calibradas, de forma garantir o mesmo nível de deslocamentos da estrutura original.

Para cada solução estrutural proposta, foi realizada uma análise de sensibilidade em termos de esforços e deformação com a variação da altura útil dos elementos estruturais.

Esta análise proporcionou uma visão adicional em relação ao comportamento geral de fachadas de vidro e permitiu obter uma série de ábacos que permitem facilmente estimar a altura total e a correspondente secção transversal dos elementos estruturais da fachada.

Estes ábacos foram obtidos para três tipos de tipologias estruturais de fachadas.

Todas as tipologias estruturais de fachadas de vidro, incluindo a solução original, foram cuidadosamente analisadas de acordo com as prescrições normativas mais relevantes.

Finalmente são apresentadas as conclusões derivadas do estudo realizado, bem como algumas sugestões para trabalhos futuros.

Palavras-chave: Vidro estrutural; Fachada em vidro; Vidro exterior agrafado; Acção do vento; Estudo paramétrico; Verificações de segurança.

Abstract

This dissertation studies the behaviour of glass as a structural element, using, as a case study, the glass façade of the Camões Theatre, in Lisbon.

The structural analysis of the façade was carried out using a finite element program (SAP 2000), in which the wind action was given particular relevance.

The finite element model respects the geometry and the structural characteristics of the façade.

Subsequently, a parametric study was made, considering different structural typologies, which were calibrated in order to yield the same displacements as the original structure.

For each proposed structural solution, a sensitive analysis was performed, both in terms of stresses and deformations, by changing the structural height of the element.

This analysis provided additional insight regarding the general behaviour of glass façades and enables to obtain a series of abacus which allow to easily estimating the total height and corresponding cross-section of the structural elements of the façade.

These abacuses were obtained for three different structural façade typologies.

All the different structural typologies for glass façades, including the original façade solution, were thoroughly analysed regarding designer prescriptions in the relevant normative regulations.

Finally, the conclusions which derived from this study are presented as well as some suggestion for future work.

Keywords: Structural glass; Glass façade; Spider glass; Wind of action; Parametric study; Safety checking.

Índice de Matérias

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice de Figuras	xiii
Índice de Quadros	xvii
Lista de abreviaturas, siglas e símbolos	xix
1. Introdução	1
1.1 Considerações gerais	1
1.2 Objectivos da dissertação	2
1.3 Organização da dissertação	2
2. Caracterização do vidro como material estrutural	5
2.1 Enquadramento Histórico	5
2.2 Composição química	9
2.3 Propriedades do vidro	9
2.3.1 Propriedades físicas	10
2.3.2 Propriedades mecânicas	10
2.3.3 Propriedades térmicas	12
2.4 Tipos de vidro em relação ao seu processo de fabrico.....	13
2.4.1 Vidro Float.....	13
2.4.1.1 Maquinação do vidro.....	15
2.4.2 Vidro Temperado.....	16
2.4.3 Vidro laminado	20
3. Regulamentação actual para estruturas em vidro	23
3.1 Normas de certificação e Normas de ensaio do vidro	23
3.2 Normas de dimensionamento	23
3.2.1 EN 1990 – “ <i>Basis of structural design</i> ”	23
3.2.2 EN 1991 – “ <i>Actions on structures</i> ”	26
3.2.3 prEN13474 – “ <i>Glass in building – Design of glass panes</i> ”	26

3.2.4 ASTM E1300 – “Standard of Practice for Determining Load Resistance of Glass in Buildings”	28
4. Sistemas de Fixação	29
4.1 Fixações aderentes	29
4.1.1 Fixações aderentes flexíveis	29
4.1.2 Fixações aderentes rígidas	31
4.2 Fixações mecânicas	31
4.2.1 Fixações contínuas	31
4.2.2 Fixações Pontuais	32
4.2.2.1 Fixações pontuais por aperto	32
4.2.2.2 Fixações pontuais aparafusadas	33
4.2.2.2.1 Constituição	34
4.2.2.2.1.1 Vidro	35
4.2.2.2.1.2 Aranha	36
4.2.2.2.1.3 Rótula	38
4.2.2.2.1.4 Mástique	39
4.2.2.2.1.5 Estrutura Portante	40
4.2.2.2.2 Acções	42
4.2.2.2.2.1 Peso próprio	42
4.2.2.2.2.3 Movimentos Diferenciais	43
4.2.2.2.3 Combinação de acções	44
5. Estudo da fachada real	45
5.1 Objectivos	45
5.2 Descrição	45
5.3 Materiais e constituintes	46
5.3.1 Painéis de vidro	46
5.3.2 Aço	47
5.3.3 Aranhas e rótulas	47
5.3.4 Cabos	48
5.3.5 Perfis metálicos	50
5.3.6 Espaçadores metálicos	50
5.4 Modelação da fachada	51

5.4.1 Acções	53
5.4.3 Combinação de acções	53
5.5 Análise de esforços	53
5.5.1 Estrutura metálica.....	53
5.5.2 Painéis de vidro	56
5.6 Análise de deslocamentos.....	58
5.7 Verificações de segurança	58
5.7.1 Estrutura metálica.....	58
5.7.2 Painéis de vidro	61
6. Estudo paramétrico com soluções estruturais alternativas	63
6.1 Apresentação geral dos modelos.....	63
6.2 Análise de sensibilidade para cada solução alternativa proposta	67
6.2.1 Modelo 1	67
6.2.1.1 Esforços	68
6.2.1.2 Deslocamentos	68
6.2.2 Modelo 2	69
6.2.2.1 Esforços	70
6.2.2.2 Deslocamentos	71
6.2.3 Modelo 3	72
6.2.3.1 Esforços	73
6.2.3.2 Deslocamentos	74
6.3 Verificações de segurança	74
6.3.1 Modelo 1	75
6.3.2 Modelo 2	76
6.3.3 Modelo 3	78
6.4 Comparação de resultados.....	79
7. Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	83
7.1 Conclusão	83
7.2 Desenvolvimentos futuros	84
Bibliografia.....	85
Anexo A.....	87

Anexo B	89
B.1 Vento actuar sobre a fachada envidraçada (fachada E).....	89
B.1.1 Valor de referência da velocidade do vento, v_b	89
B.1.2 Velocidade média do vento a uma altura z acima do solo, v_{mz}	90
B.1.3 Intensidade de turbulência à altura z , I_{vz}	91
B.1.4 Pressão dinâmica de pico à altura z , $q_P(z)$	92
B.1.5 Coeficientes de pressão exterior e interior	92
B.2 Vento actuar sobre a fachada D.....	96
B.3 Vento actuar sobre a fachada A ou B	97
Anexo C	99
Anexo D	103
Anexo E	105
Anexo F	107

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Fabricação do vidro pelo processo de sopro [38].	5
Figura 2.2 - Vitrais da Catedral de Saint Chapelle, 1248 [42].	6
Figura 2.3 - Hardwick Hall, em Inglaterra [45].	6
Figura 2.4 - Palm House, 1843 [31].	6
Figura 2.5 - Halle au Blé (actualmente Bourse du commerce, Paris, 1806 - 1811, a primeira grelha estrutural em aço [23].	7
Figura 2.6 - Palácio de Cristal, de Joseph Paxton 1851 [42].	7
Figura 2.7 - Museu Nunimástica, Lisboa [30].	8
Figura 2.8 - Torre Zen, Lisboa [30].	8
Figura 2.9 - Palácio Sotto Mayor [30].	8
Figura 2.10 - Hotel Villa Rica, Lisboa [30].	8
Figura 2.11 – Composição química do vidro.	9
Figura 2.12 – Tensão x Deformação para o vidro e o aço [23].	10
Figura 2.13 - Efeitos de esforços de compressão e tracção sobre uma fenda [26]	11
Figura 2.14 - Etapas do processo de fabrico do vidro float [21].	13
Figura 2.15 - Arrefecimento do vidro solidificado [23].	14
Figura 2.16 - Pannel de vidro após arrefecimento e inspecção visual [23].	14
Figura 2.17 - Fractura padrão do vidro recozido "float" [23].	15
Figura 2.18 – Distâncias entre furos e arestas [23].	16
Figura 2.19 - Furos cilíndricos e cónicos [23].	16
Figura 2.20 - Etapas do fabrico do vidro temperado.	16
Figura 2.21 - Zonas de compressão e tracção na secção transversal do vidro temperado [43]	17
Figura 2.22 - Princípio da têmpera do vidro [10].	18
Figura 2.23 - Padrão de fractura do: (a) vidro recozido, (b) vidro termo-endurecido e (c) vidro totalmente temperado [13].	19
Figura 2.25 - Etapas de produção do vidro laminado.	20
Figura 2.24 – Composição do vidro laminado.	20
Figura 2.26 - Vidro laminado com: (a) – dois painéis de vidro com igual espessura; (b) – dois painéis de vidro com espessura diferente; (c) – três painéis de vidro com diferentes espessuras [23].	21
Figura 2.27 - Comportamento pós-rotura do vidro laminado composto com diferentes tipos de vidro [21].	21
Figura 2.28 - Desempenho pós-rotura do vidro laminado constituído por PVB e por Sentry Glass [11].	22
Figura 4.1 - Vidro exterior colado [32].	30
Figura 4.2 - Sistema de fixação contínuo – fachada cortina [8 e 13].	32
Figura 4.3 - Fixação pontual de aperto [21] e [11].	32
Figura 4.4 – “Glass fins” [6].	33
Figura 4.5 - Fixação aparafusada sem relevo (esquerda) e com relevo (direita) [21].	34
Figura 4.6 - Constituintes do sistema “ vidro exterior agrafado “ [6].	34
Figura 4.7 - Exemplo de aplicação do modelo 1 de aranha [16].	36
Figura 4.8 - Modelo 1 - Aranhas de aço inoxidável AISI 316 com 4,3,2,1 braços respectivamente [65].	36
Figura 4.9 - Modelo 2 - Aranha em aço de alta resistência GGG-50 DIN-1693 [16].	37
Figura 4.10 – Exemplo de aplicação do modelo 2 de aranha [16].	37
Figura 4.11 - Modelo 3 - Aranha em aço de alta resistência GGG-50 DIN-1693 [16].	37
Figura 4.12 - Exemplo de aplicação do modelo 3 de aranha [16].	37
Figura 4.13 - Exemplo de aplicação do modelo 4 de aranha [16].	37

Figura 4.14 - Modelo 4 - Aranha em aço de alta resistência GGG-50 DIN-1693 [16].	37
Figura 4.15 - Exemplo de aplicação do modelo 5 de aranha [16].	37
Figura 4.16 - Modelo 5 - Aranha em aço de alta resistência GGG-50 DIN-1693 [16].	37
Figura 4.17 - Rótula em aço inox para vidro temperado entre 10 e 15mm - furo cónico [6].	38
Figura 4.18 - Rótula com tampa cónica de aperto exterior para vidro temperado 10 a 16mm – furo cónico [6].	38
Figura 4.19 - Rótula em aço inox de tampa de aperto exterior para vidro laminado/temperado 12 a 26mm – furo cilíndrico [6].	38
Figura 4.20 - Rótula em aço inox para fachada em vidro duplo temperado 28 a 36mm – furo cónico [6].	38
Figura 4.21 - Rótula em aço inox para vidro duplo temperado 28 a 36mm – furo cilíndrico [6].	38
Figura 4.22 - Juntas de mástique.	39
Figura 4.23 - Exemplo de fachada suportada por perfis tubulares [28].	40
Figura 4.24 - Exemplos de traçados de cabos [12].	41
Figura 4.25 - Esticador de aço AISI 316 [5].	41
Figura 4.26 - Estrutura de suporte composta por cabos parabólicos e perfil de aço [28].	42
Figura 4.27 - Efeito do peso próprio [36].	43
Figura 4.28 - Deformação do painel devido a acção do vento [36].	43
Figura 4.29 - Deformação devida à variação de temperatura [36].	44
Figura 5.1 - Teatro de Camões [63].	45
Figura 5.2 - Fachada envidraçada do Teatro de Camões.	45
Figura 5.3 – Dimensões da fachada em análise.	46
Figura 5.4 - Dimensões dos painéis da fachada em estudo.	47
Figura 5.5 - Aranha com quatro braços.	47
Figura 5.6 – Aranha com dois braços.	47
Figura 5.8 – Vista inferior dos cabos horizontais.	48
Figura 5.7 - Traçado de cabos horizontais.	48
Figura 5.9 – Esticadores dos cabos horizontais.	49
Figura 5.10 - Cabos verticais.	49
Figura 5.11 – Fixação dos cabos verticais.	49
Figura 5.12 - Ligação base do perfil HEB 300 [19].	50
Figura 5.13 - Espaçadores.	50
Figura 5.14 - Modelo tridimensional da fachada com os painéis de vidro.	51
Figura 5.16 - Modelo bidimensional da fachada existente.	52
Figura 5.15 - Modelo tridimensional da fachada sem os painéis de vidro.	52
Figura 5.17 - (a) - Diagrama de esforço axial e (b) – Diagrama de momento flector para a combinação fundamental (sucção) - Modelo real.	54
Figura 5.18 - Esforço axial devido à acção do vento, que actuar perpendicularmente à fachada de vidro (mais condicionante).	55
Figura 5.19 - Esforço axial nos cabos horizontais pré-tensionados.	56
Figura 5.21 - Diagrama de distribuição de tensões de Von Mises ao longo do painel (sobrepessão).	57
Figura 5.20 - Diagrama de distribuição de tensões de Von Mises para o vento actuar perpendicularmente à fachada (mais condicionante).	57
Figura 5.22 – Deslocamentos na fachada real para a combinação frequente.	58
Figura 5.23 – Verificação de segurança do modelo real	60
Figura 6.1 – Tipologias estruturais estudadas (a) – Modelo 1, (b) – Modelo 2, (c) – Modelo 3.	63
Figura 6.2 – Deformadas do: (a) – modelo real, (b) – Modelo 1, (c) – Modelo 2, (d) – Modelo 3.	64
Figura 6.3 - Vista tridimensional do modelo 1	65
Figura 6.4 - Vista tridimensional do modelo 3.	66
Figura 6.5 – Vista tridimensional do modelo 2.	66
Figura 6.6 - Modelos bidimensionais do modelo 1 com altura útil de: (a) - 0,60 m, (b) - 1,20 m, (c) - 1,80 m.	67

Figura 6.7 – Diagramas de esforço axial do modelo 1 para a altura útil de: (a) - 0,60 m, (b) - 1,20 m, (c) - 1,80 m.	68
Figura 6.8 – Deformada do modelo 1 para a altura útil de: (a) - 0,60 m, (b) - 1,20 m, (c) - 1,80 m.	69
Figura 6.9 - Modelos bidimensionais do modelo 2 com altura útil de: (a) - 0,60 m, (b) - 1,20 m, (c) - 1,80 m.	69
Figura 6.10 – Diagramas de esforço axial do modelo 2 para a altura útil de: (a) - 0,60 m, (b) - 1,20 m, (c) - 1,80 m.	70
Figura 6.11 - Diagramas de momento flector do modelo 2 para a altura útil de: (a) - 0,60 m, (b) - 1,20 m,	71
Figura 6.12 - Deformada do modelo 2 para a altura útil de: (a) - 0,60 m, (b) - 1,20 m, (c) - 1,80 m.	72
Figura 6.13 - Modelos bidimensionais do modelo 3 com altura útil de: (a) - 0,60 m, (b) - 1,20 m, (c) - 1,80 m.	72
Figura 6.14 - Diagramas de esforço axial do modelo 3 para a altura útil de: (a) - 0,60 m, (b) - 1,20 m, (c) - 1,80 m.	73
Figura 6.15 - Deformada do modelo 3 para a altura útil de: (a) - 0,60 m, (b) - 1,20 m, (c) - 1,80 m.	74
Figura 6.16 – Verificação de segurança dos elementos metálicos do modelo 1 para a altura útil de: (a) - 0,60 m, (b) - 1,20 m, (c) - 1,80 m., de acordo com o Eurocódigo 3 – parte 5.	75
Figura 6.17 - Verificação de segurança dos elementos metálicos do modelo 2, de acordo com o Eurocódigo 3 – parte 5.	77
Figura 6.18 - Verificação de segurança dos elementos metálicos do modelo 3, de acordo com o Eurocódigo 3 – parte 5.	78
Figura 6.19 – Diagrama deslocamento - altura útil para as três soluções estruturais.	79
Figura 6.20 - Diagrama esforço axial - altura útil para as três soluções estruturais.	80
Figura B.1 – Denominação das fachadas do Teatro de Camões.	89
Figura B.2 – Procedimento recomendado para a determinação do coeficiente de pressão exterior "c" _ "pe" em edifícios para áreas carregadas entre 1m ² e 10m ²	92
Figura B.3 – Zonas em paredes verticais.	92
Figura B.4 – Altura de referencia ze em função de h e b, e corresponde perfil de pressão dinâmica..	94

Índice de Quadros

Quadro 2.1 – Propriedades mecânicas do vidro [21 e 6].....	12
Quadro 2.2 – Propriedades térmicas do vidro segundo a Norma DIN EN572-1-2004 [7].....	13
Quadro 2.3 – Espessuras disponíveis para o vidro tipo float e as respectivas tolerâncias [23].	15
Quadro 2.4 – Resistência à tracção do vidro recozido, termo-endurecido e temperado.....	17
Quadro 2.5 – Resistência à flexão do vidro recozido, termo-endurecido e do temperado [23].	18
Quadro 2.6 – Propriedades físicas do PVB [11].....	21
Quadro 3.1 – Coeficientes parciais para EL Último e EL Utilização segundo a norma prEN – 13474-1-1999].	25
Quadro 3.2 – Coeficientes de redução para EL Último e EL Utilização segundo a norma [prEN – 13474-1-1999]	25
Quadro 4.1 –Tipos de vidros adequados para o sistema “Spider Glass” [21].	35
Quadro 5.1 – Propriedades dos painéis de vidro “SGG Securit” [41].....	46
Quadro 5.2 – Características do aço S355.	47
Quadro 5.3 – Características do cabo ACOMO M25 [24].	48
Quadro 5.4 – Pressões características do vento que actuam sobre a fachada de vidro (fachada E). .	53
Quadro 5.5 – Valores de esforço axial máximo nos espaçadores e no perfil HEB300 para a combinação fundamental - Modelo real.	53
Quadro 5.6 – Valores do momento flector máximo no perfil HEB300 para a combinação fundamental – Modelo real.	54
Quadro 5.7 – Valores máximos e mínimos da tensão de Von Mises para o modelo do painel isolado.	57
Quadro 5.8 – Esforços resistentes para os elementos do modelo real.	60
Quadro 6.1 – Secções adoptadas para o modelo 1, segundo a norma BS EN 10219-2.	65
Quadro 6.2 – Secções adoptadas para o modelo 2.	65
Quadro 6.3 – Secções adoptadas para o modelo 3.	65
Quadro 6.4 – Valores de esforço axial máximo nas secções tubulares do arco e nos seus montantes do modelo 1 para as alturas úteis de 0,60 m, 1,20 m e 1,80m.	68
Quadro 6.5 – Valores de esforço axial máximo nos cabos e distanciador metálico do modelo 2 para as alturas úteis de 0,60 m, 1,20 m e 1,80m.....	70
Quadro 6.6 – Valores de momento flector máximo nos perfis HEB 200 do modelo 2 para as alturas úteis de 0,60 m, 1,20 m e 1,80m.	71
Quadro 6.7 – Valores de esforço axial máximo nos cabos e nos distanciadores metálicos do modelo 3 para as alturas úteis de 0,60 m, 1,20 m e 1,80m.	73
Quadro 6.8 – Esforços resistentes para os elementos do modelo 1 para as alturas úteis de 0,60 m, 1,20 m e 1,80m.	75
Quadro 6.9 – Novas secções adoptadas para a altura útil de 0,60 m.....	76

Quadro 6.10 – Novas secções adoptadas para o modelo 1 com altura útil de 1,20 m.	76
Quadro 6.11 – Esforços resistentes para os elementos do modelo 2 para as alturas úteis de 0,60 m, 1,20 m e 1,80m.....	76
Quadro 6.12 – Novas secções adoptadas para o modelo 2 para a altura útil de 0,60 m.	77
Quadro 6.13 – Novas secções adoptadas para o modelo 2 para a altura útil de 1,20 m.	77
Quadro 6.14 – Esforços resistentes para os espaçadores metálicos do modelo 3 para as alturas úteis de 0,60 m, 1,20 m e 1,80m.....	78
Quadro 6.15 – Esforço axial e diâmetro do perfil CHS para um deslocamento de 3,0 mm.	80
Quadro A.1 – Normas de certificação e normas de ensaio dos vários tipos vidro.	88
Quadro B.1 – Valor básico da velocidade de referência do vento.	90
Quadro B.2 –Categorias e parâmetros de terreno.....	90
Quadro B.3 – Valores recomendados dos coeficientes de pressão exterior para paredes verticais de edifícios de planta rectangular.....	92
Quadro B.4 – Altura mínima, comprimento de rugosidade, coeficiente de terreno e de rugosidade e velocidade média com o vento actuar perpendicularmente à fachada D.	96
Quadro B.5 – Intensidade de turbulência e pressão dinâmica de pico do vento sobre a fachada D....	96
Quadro B.6 – Coeficientes de pressão exterior e sucções provocadas na fachada E.....	96
Quadro B.7 – Altura mínima, comprimento de rugosidade, coeficiente de terreno e de rugosidade e velocidade média com o vento actuar perpendicularmente à fachada A ou B..	96
Quadro B.8 – Intensidade de turbulência e pressão dinâmica de pico $d_{m,nb}$,mo vento sobre a fachada A ou B.	96
Quadro B.9 – Distâncias correspondentes as zonas A, B e C da fachada envidraçada... ..	96
Quadro B.10 – Coeficientes de pressão exterior e sucções provocadas na fachada E.....	97
Quadro C.1 – Valor característico da tensão de rotura para vidros temperados.	98
Quadro C.2 – Factor de tamanho k_A	98
Quadro C.3 –Factor de modificação k_{mod}	98
Quadro C.4 – Coeficientes parciais γ_m e γ_v	99
Quadro C.5 – Factor parcial nacional γ_n	99
Quadro D.1 – Coeficiente do tipo de vidro (GTF) para painel de vidro monolítico ou laminado.....	102
Quadro D.2 – Valor característico da tensão resistente para uma carga actuar durante 3 segundos... ..	102
Quadro E.1 - Dados técnicos de acordo com as normas BS 5889 Tipo B, ASTM C920, TT-S-00230C, TT-S-0015434, DIN 18540, T-2, CLASSE E [34].	104

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

Abreviaturas e Siglas

ELU	Estados Limites Últimos
ELUt	Estados Limites de Utilização
EC1	Eurocódigo 1
EC3	Eurocódigo 3
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
PVB	Polivinil butiral
UNL	Universidade Nova de Lisboa
VEC	Vidro exterior colado

Símbolos

Letras maiúsculas latinas

A	Área total de vidro sobre a qual actua a acção
C	Calor específico
E	Módulo de Elasticidade
G	Modulo de Distorção
$G_{k,j}$	Valor característico da carga permanente
GTF	Coeficiente que depende do tipo de vidro e da duração da carga
LR	Valor da carga resistente
$M_{b,Rd}$	Valor de cálculo do momento flector resistente à encurvadura
M_{cr}	Momento crítico elástico para a encurvadura lateral
M_{Ed}	Valor de cálculo do momento flector actuante
M_{Rd}	Valor de cálculo do momento flector resistente
NFL	Valor característico da carga resistente
$N_{b,Rd}$	Valor de cálculo do esforço axial
$N_{cr,F}$	Valor crítico do esforço de encurvadura elástica por flexão
$N_{cr,T}$	Esforço axial crítico associado ao modo de encurvadura elástica por torção
$N_{cr,TF}$	Esforço axial crítico ao modo de encurvadura elástica por flexão – torção
N_{Ed}	Valor de cálculo do esforço axial de compressão
N_{Rd}	Valor de cálculo do esforço axial resistente
$Q_{k,i}$	Valor característico das restantes acções variáveis
R	Raio de concordância;

V_{Rd}	Valor de cálculo do esforço transversal resistente
W_y	Módulo flexão da secção

Letras minúsculas latinas

a	Relação entre a área da alma e a área bruta de uma secção transversal
b	Largura total
c_{dir}	Coeficiente de direcção
c_r	Coeficiente de rugosidade
c_{pe}	Coeficiente de pressão externa
c_{pi}	Coeficiente de pressão interna
c_{season}	Coeficiente de época ou sazão
c_o	Coeficiente de orografia
$f_{g,d}$	Tensão admissível do vidro
$f_{g,k}$	Valor característico da tensão do vidro recozido
$f_{b,k}$	Valor característico da tensão de rotura para vidros temperados
f_y	Tensão de cedência do aço
h	Altura total do perfil
h_w	Altura da alma
i	Raio de giração em relação ao eixo apropriado
k_A	Coeficiente que contabiliza a área do vidro
k_l	Coeficiente de turbulência
k_{mod}	Coeficiente parcial que tem em conta a duração do carregamento
k_r	Coeficiente de terreno
n	Relação entre os valores de cálculo dos esforços normais actuante e resistente
q	Valor da carga lateral de dimensionamento
v_b	Velocidade básica do vento
$v_{b,0}$	Valor fundamental da velocidade básica do vento
v_m	Velocidade média do vento
w_e	Carga distribuída resultante da acção do vento no exterior
w_i	Carga distribuída resultante da acção do vento no interior
z	Altura de referência
z_o	Comprimento de rugosidade
z_{min}	Altura mínima
z_e	Altura de referência para a pressão exterior
z_i	Altura de referência para a pressão interior
z_g	Distância do ponto de aplicação ao centro de corte

Letras gregas

β	Parametro de forma da tensão de rotura
$Y_{G,j}$	Factor parcial para as acções permanentes
Y_M	Coeficiente parcial que depende da resistência do vidro
Y_{Mo}	Coeficiente parcial de segurança
Y_n	Coeficiente parcial nacional
$Y_{Q,i}$	Factor parcial para a acção variável
Y_V	Coeficiente parcial para a tensão residual devido à têmpera
H	Factor de conversão
ν	Coeficiente de Poisson
ρ	Massa volúmica do ar
σ_{eff}	Tensão efectiva actuante;
$\sigma_1(x,y)$	Tensão principal que actua no ponto (x,y) para a respectiva acção actuante
$\Psi_{0,i}$	Coeficiente de redução correspondente à acção variável
$\Psi_{1,i}$	Coeficiente de redução para as acções variáveis
$\Psi_{2,i}$	Coeficiente de redução para as acções variáveis

1. Introdução

1.1 Considerações gerais

Desde o século XIX, o vidro foi eleito pelos arquitectos como um símbolo da arquitectura contemporânea, levando a um acréscimo da sua aplicação em Engenharia Civil, não só por possuir características naturais únicas, tais como luminosidade, estética, leveza e transparência, mas também pela sua eficiência no desempenho estrutural.

Socialmente, no início da sua produção, o vidro era considerado um material inseguro, fraco e perigoso, não tendo sido bem aceite como material de construção [17].

Na verdade, o vidro é um material frágil em termos de rotura, isto é, o vidro não se deforma plasticamente, partindo sem qualquer aviso prévio, ao contrário do que acontece com o aço, que devido à sua ductilidade, tem capacidade de se deformar antes da rotura.

Apesar da sua rotura frágil, o vidro é bastante resistente e versátil, tendo-se verificado um crescimento constante da sua utilização nas estruturas desde a sua primeira aplicação em janelas [17].

Para contornar o problema da fragilidade, o vidro pode ser submetido a tratamentos térmicos, de modo a incrementar a sua resistência, podendo até resistir a cargas mais elevadas do que o aço [22]. É também possível tornar a sua rotura mais dúctil, através do processo de laminação.

A grande evolução, não só em termos das propriedades do vidro, como foi referido atrás, mas também ao nível das ligações e das estruturas portantes, permitiram aos engenheiros e arquitectos criar novas soluções, de modo aumentar as aplicações do vidro como elemento estrutural, e não apenas como material de preenchimento e em janelas.

Contudo, para a elaboração destes projectos inovadores, é necessário um vasto conhecimento técnico para um dimensionamento preciso, e um grande investimento económico.

Este progresso possibilitou o aparecimento de estruturas com um aspecto menos denso, com a substituição do aço, do betão e de alvenaria por painéis de vidro, e dispositivos de suportes mais discretos e aprimorados que os caixilhos tradicionais, aumentando desta forma a leveza, a transparência e a estética dos edifícios.

Hoje em dia, o grande crescimento do vidro como elemento estrutural na construção civil é bastante evidente a nível das fachadas, coberturas, pisos, escadas, vigas e pilares, apesar da sua aplicação em fachadas ser ainda, a mais comum [21].

A fachada é o primeiro impacto que o observador tem antes de entrar num edifício. Dos diversos sistemas estruturais de suporte de fachadas existentes actualmente este trabalho irá abordar mais detalhadamente o estudo do comportamento de fachadas com o uso do “vidro exterior agrafado”.

1.2 Objectivos da dissertação

Nesta dissertação pretende-se analisar o comportamento estrutural de uma fachada em vidro existente sujeita à acção do vento.

Para melhor compreensão do seu comportamento em termos de deformabilidade e de resistência, esta será modelada através de um programa de cálculo automático SAP 2000.

Posteriormente são propostas diferentes tipologias estruturais, em que as suas secções são calibradas, de forma que os seus deslocamentos sejam iguais ao da fachada original.

O objectivo da análise destas soluções estruturais é obter um conjunto ábacos, que permitam estimar facilmente a altura total e a correspondente secção transversal dos seus elementos estruturais. Para tal, será realizada uma análise de sensibilidade para cada tipologia com diferentes alturas úteis, onde são avaliadas as variações em termos de esforços e deslocamentos.

1.3 Organização da dissertação

De acordo com os objectivos acima descritos, a presente dissertação está estruturada em 7 capítulos e por alguns anexos com os conteúdos a seguir descritos:

- Capítulo 1 – “Introdução” – Neste capítulo é feita uma apresentação concisa do tema em estudo e dos objectivos pretendidos ao longo do trabalho.
- Capítulo 2 – “Caracterização do vidro como elemento estrutural” – Será feito um enquadramento histórico do vidro, uma descrição dos tipos, das propriedades intrínsecas, e os processos de fabrico dos vários tipos de vidro utilizados na construção.
- Capítulo 3 – “Regulamentação actual para estruturas em vidro” – Neste capítulo são apresentadas, de uma forma muito resumida, as normas técnicas e de ensaio existentes para os diferentes tipos de vidro usados na construção, como também as principais normas de dimensionamento para os painéis de vidro.
- Capítulo 4 – “Sistemas de fixação” – Neste capítulo, é feita uma descrição dos diferentes sistemas de fixação usados para suportar as fachadas em vidro, dando maior ênfase ao sistema de fixação, vidro exterior agrafado.
- Capítulo 5 – “Estudo da fachada real” – Ao longo deste capítulo, será apresentado a fachada em estudo e feita a sua modelação num programa de cálculo. Posteriormente será feita análise dos resultados obtidos, em termos de esforços e deformações e as respectivas verificações de segurança, de acordo com as prescrições regulamentares.

- Capítulo 6 – “Estudo paramétrico com soluções estruturais alternativas” – Neste capítulo será feita uma análise do comportamento de outras soluções estruturais a nível da estrutura de portante com diferentes alturas úteis. E por fim, são determinadas as secções necessárias dos elementos estruturais para garantir a segurança da estrutura, segundo o Eurocódigo 3.
- Capítulo 7 – “Conclusão e desenvolvimentos futuros” – Por fim, são apresentadas as conclusões relativas a este trabalho, e são ainda sugeridos alguns possíveis desenvolvimentos futuros.

O conjunto de anexos apresenta as seguintes informações auxiliares:

- Anexo A – Normas de certificação e normas de ensaio do vidro;
- Anexo B – Quantificação da acção do vento que actua sobre a fachada existente segundo o EC1-4;
- Anexo C – Quantificação da tensão máxima admissível segundo a norma prEN13474-1;
- Anexo D – Carga resistente do vidro segundo ASTM E1300;
- Anexo E – Características do silicone de reticulação acética;
- Anexo F – Determinação da pré-tensão aplicar nos cabos horizontais.

2. Caracterização do vidro como material estrutural

2.1 Enquadramento Histórico

Hoje em dia, existem distintas hipóteses sobre a origem do vidro. Sob a forma natural surge como rocha vulcânica, obsidiana, que, apesar de não ser um material transparente, deixa-se atravessar pela luz (translúcida).

Não se sabe ao certo quando surgiu o vidro produzido pelo homem, sendo que era usado apenas como adorno. Por essa razão, a sua transparência não era tão relevante como é nos dias de hoje [22].

Anos mais tarde o vidro foi aplicado como material de construção, após a invenção do processo de sopro, o qual permitiu para além do fabrico de recipientes, o aparecimento do vidro plano.

Este processo consiste em colocar uma pequena porção de vidro fundido numa extremidade do tubo, e na outra soprar, até aparecer uma bolha no interior da massa que será o interior do recipiente quando o vidro arrefecer. Para a obtenção do vidro plano, o pedaço de vidro na ponta do tubo era submetido a dois procedimentos simultâneos, ao sopro e à rotação que, através da força centrífuga, essa massa tendia a ganhar a forma de um disco plano (Figura 2.1).



Figura 2.1 - Fabricação do vidro pelo processo de sopro [38].

Na idade média, o vidro plano obtido por este método, ainda presentemente usado, com alguns aperfeiçoamentos, possibilitou a produção de vitrais para igrejas e catedrais, como por exemplo a catedral de Saint Chapelle (Figura 2.2).

Os pedaços de vidro eram suportados por uma estrutura extremamente densa de ferro que, apesar da baixa transparência e das elevadas imperfeições ópticas, proporcionou a entrada de luz natural no interior das estruturas.



Figura 2.2 - Vitrais da Catedral de Saint Chapelle, 1248 [42].

Com este desenvolvimento do vidro plano era muito invulgar encontrar casas sem janelas de vidro. No século XVI foi construído o Hardwick Hall (Figura 2.3) em Derbyshire, Inglaterra, o qual era considerado o primeiro edifício a possuir nas suas fachadas mais vidro do que parede [42].



Figura 2.3 - Hardwick Hall, em Inglaterra [45].

Em meados do século XIX, com os avanços da tecnologia trazidos pela revolução industrial, o vidro surgiu como material de preenchimento nas estufas inglesas (Figura 2.4).



Figura 2.4 - Palm House, 1843 [31].

O surgimento das estruturas revestidas de vidro foi facilitado com o desenvolvimento do ferro, que constitui uma grelha estrutural capaz de suportar os painéis de vidro.

A primeira grelha a ser construída foi Bourse du commerce em Paris (Figura 2.5) [23].



Figura 2.5 - Halle au Blé (actualmente Bourse du commerce, Paris, 1806 - 1811, a primeira grelha estrutural em aço [23].

Desta forma, era evidente a transparência e grande luminosidade no interior das estruturas, entre as quais se pode destacar, neste período, o Palácio de Cristal (Figura 2.6) [42].



Figura 2.6 - Palácio de Cristal, de Joseph Paxton 1851 [42].

No século XX, a pressão sobre os fabricantes para produzir vidro de alta qualidade, isto é, com menos distorções e com uma espessura constante, conduziu ao desenvolvimento da indústria vidraceira, surgindo o processo float, o qual vai ser detalhado no subcapítulo 2.4.

Este processo foi desenvolvido por Pilkington, sendo ainda hoje usado, o qual consiste em produzir vidro com superfícies perfeitamente planas, com espessura constante e preço reduzido [2].

Devido à rotura frágil do vidro, os engenheiros estavam hesitantes em usá-lo como elemento estrutural.

Mas com a necessidade de envolver áreas com maiores dimensões, com a maior transparência possível, nas últimas décadas têm vindo a ser desenvolvidos tratamentos secundários, a fim de aumentar a capacidade resistente do vidro. Em paralelo, o desenvolvimento de métodos de fixação e estruturas de suporte mais esbeltas e inovadoras, possibilitaram a construção de estruturas mais diversificadas e seguras.

Assim, os limites do vidro foram amplificados começando a ganhar destaque como elemento estrutural.

Até aos dias de hoje, as suas principais aplicações são em fachadas, coberturas, pavimentos, vigas e colunas [21].

Nas figuras seguintes estão demonstrados alguns exemplos dessas aplicações.



Figura 2.8 - Torre Zen, Lisboa [30].



Figura 2.7 - Museu Nuniástica, Lisboa [30].



Figura 2.9 - Palácio Sotto Mayor [30].



Figura 2.10 - Hotel Villa Rica, Lisboa [30].

2.2 Composição química

O vidro é um material que se obtém por um arrefecimento rápido de uma massa em fusão, que vai endurecer até atingir uma determinada rigidez, sem a formação de cristais (amorfo).

Quimicamente, podem ser fabricados diversos tipos de vidro, consoante a sua finalidade.

Na construção civil, o tipo de vidro mais utilizado é o silício-sodo-cálcico, o qual é composto por uma elevada quantidade de dióxido de sílica, um dos elementos mais abundantes na crosta terrestre [15].

A sílica compõe, em geral, 70% a 72% do total da matéria-prima, à qual são adicionados com quantidades inferiores: um fundente (cerca de 14%), sob a forma de óxido de sódio para diminuir o ponto de fusão da massa silícea para 550°C; um estabilizante, óxido de cálcio (cerca de 10%), para evitar a solubilidade do composto (sílica + fundente) e para melhorar a resistência química; e por outros óxidos, tais como alumínio e o magnésio cuja função é aumentar a resistência mecânica e garantir a resistência do vidro a agentes atmosféricos (Figura 2.11) [15].

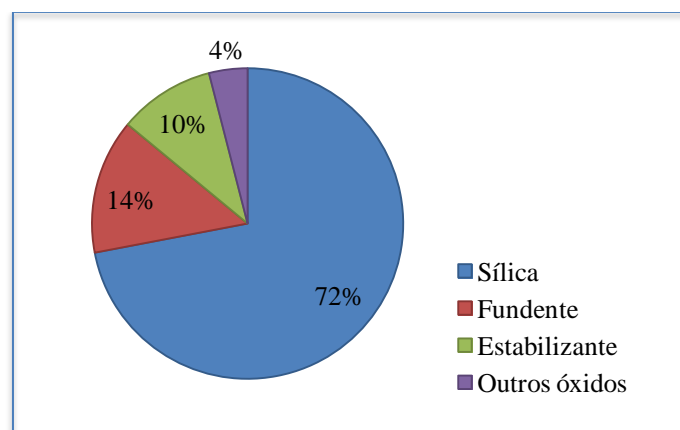


Figura 2.11 – Composição química do vidro

Pequenas variações numa mistura podem alterar as propriedades e as características mecânicas do vidro.

Como o vidro é um material reciclável, na sua produção podem ser adicionados fragmentos de vidros quebrados, tornando a fusão mais rápida [22].

2.3 Propriedades do vidro

O desempenho estrutural de cada material de construção depende das suas propriedades intrínsecas. No caso do vidro, as suas propriedades não dependem da direcção ou da orientação (material isótropo) [23], mas sim da sua composição química e da velocidade de arrefecimento durante o seu processo de fabrico.

2.3.1 Propriedades físicas

As propriedades físicas a analisar relativas ao vidro são a densidade, dureza e a sua resistência à abrasão.

A densidade do vidro é muito semelhante à do betão, cerca de 2500 kg/m^3 , variando consoante a composição do vidro [13].

O vidro tem uma dureza de 6.5, sendo esta classificada segundo a escala de MOHS, que quantifica a dureza dos minerais, indicando uma estimativa qualitativa da resistência que o vidro tem ao risco [15].

A fricção e erosão tendem a desgatar progressivamente a superfície do material, alterando o seu aspecto físico. O vidro, apesar de estar sujeito a esses processos, possui uma excelente resistência à abrasão, isto é, tem uma elevada resistência ao desgaste.

2.3.2 Propriedades mecânicas

O vidro, ao ser submetido a cargas crescentes, num ensaio de tracção, observa-se que é um material frágil, deformando-se elasticamente, voltando à sua posição inicial quando cessada a força que o deforma. A capacidade de se deformar plasticamente é nula, não sendo capaz de redistribuir esforços. Ao atingir o seu limite elástico, quebra-se, sem qualquer aviso prévio, sendo o seu limite de elástico igual ao limite de rotura.

Ao contrário do vidro, o aço além de se poder também deformar elasticamente, pode deformar-se plasticamente quando ultrapassa a tensão de cedência, rompendo apenas quando atinge o seu limite de rotura. [1]

Por estas razões, em termos de projecto, é necessário cuidados adicionais na quantificação das acções a que o vidro vai estar sujeito, como se pode observar pela análise da Figura 2.12.

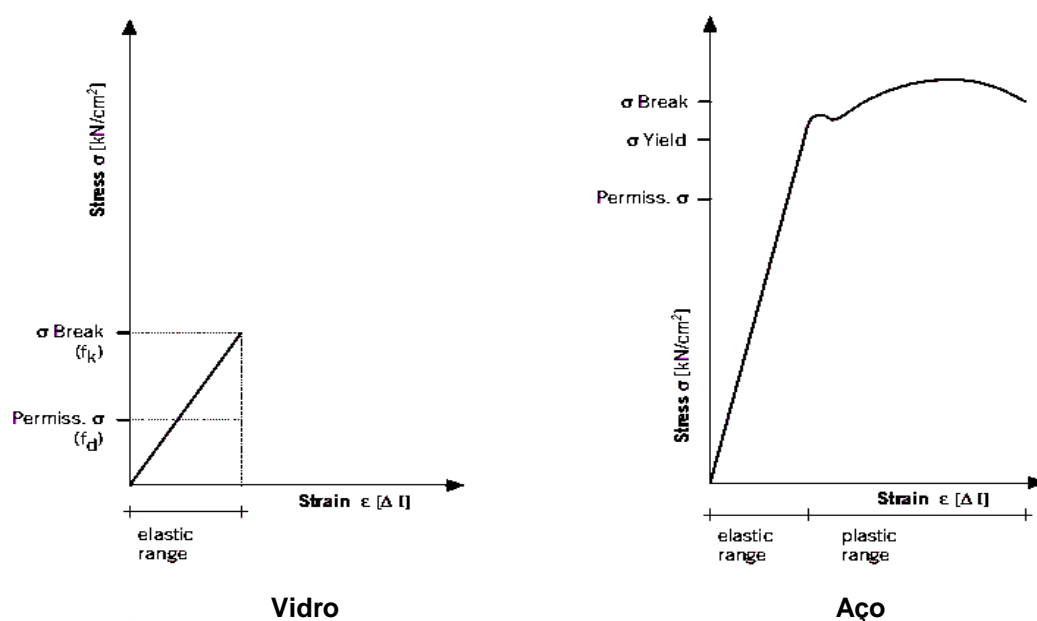


Figura 2.12 – Tensão x Deformação para o vidro e o aço [23].

O vidro é um material perfeitamente elástico, não apresentando deformações permanentes [15].

Comparado com outros materiais de construção, o vidro tem um módulo de elasticidade relativamente alto ($E=70\text{GPa}$), cerca de $1/3$ do módulo de elasticidade do aço [23].

Outro aspecto importante do vidro é o coeficiente de Poisson, pois quando é aplicada uma tensão o material alonga na direcção em esta é aplicada, e a sua secção transversal diminui. Este coeficiente é a relação entre o que a secção contrai na direcção perpendicular da tensão aplicada e o alongamento na sua direcção. Para o vidro este coeficiente é igual a $0,2$ [40]. Os valores destes parâmetros, apesar de serem obtidos em ensaios sob condições idealizadas não dão uma representação ideal da resistência prática do vidro [22].

O vidro pode atingir uma resistência teórica à tracção de 8000MPa , determinada com base nas ligações atómicas dos seus constituintes químicos [23].

A probabilidade de fabricar painéis de vidro sem qualquer defeito é nula, tal como saber a sua quantidade e localização, e consequente a sua resistência à tracção [42]. A presença de imperfeições, devido não só ao facto do vidro conter uma microestrutura com muitas irregularidades e defeitos, mas também causados pela abrasão, vento e outros efeitos mecânicos durante a utilização, leva a uma discrepância entre o valor da resistência teórica e da resistência prática do vidro, que corresponde a cerca de 1% do valor teórico.

Além disso, esta diferença depende também do tipo e da idade do vidro, da duração da solicitação, do meio envolvente (teor da humidade do ar promove a propagação de fissuras críticas) e das dimensões do painel, pois com o aumento da área, maior será a probabilidade de existirem defeitos.

Relativamente à resistência à compressão do vidro prática, é cerca de 500MPa , muito inferior ao seu valor teórico de 900MPa . Esta diminui menos com a existência de imperfeições no vidro.

A resistência à compressão do vidro quando sujeito a uma carga permanente decresce para 170MPa .

Tal como o betão, o vidro resiste bem à compressão e mal à tracção, logo, esforços de tracção nas zonas danificadas levam a concentrações de tensões na raiz da fissura e a sua propagação, aumentando a fragilidade do painel (Figura 2.13). Quando estas ultrapassam o limite de tensão, o vidro quebra, a fissura estende-se a uma alta velocidade de uma face à outra em toda a área do painel. [23]

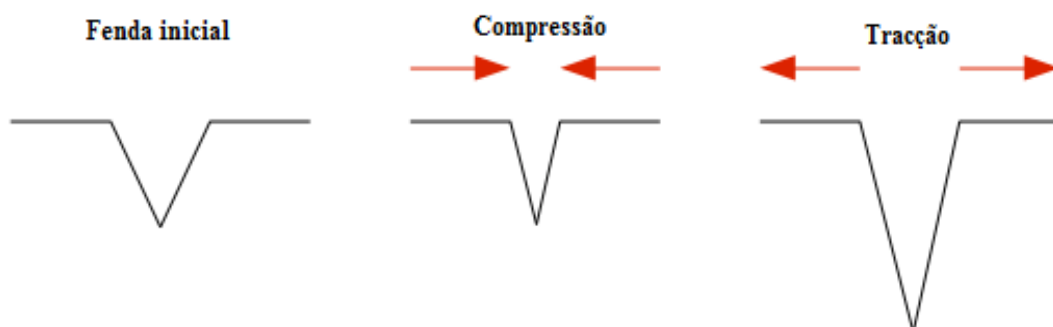


Figura 2.13 - Efeitos de esforços de compressão e tracção sobre uma fenda [26]

A resistência mecânica do vidro pode ser melhorada, através de processos termo-mecânicos (exemplo: têmpera), criando compressões em toda a superfície da peça, evitando o aparecimento e a propagação de fissuras, protegendo a sua superfície de tal modo que o surgimento de fissuras durante o manuseio seja dificultado [1]. Apesar da rotura frágil do vidro, estes melhoramentos permitem que seja usado como material estrutural.

As propriedades mecânicas relativas ao vidro estão apresentadas no Quadro 2.1.

Módulo de Young E (GPa)	70 – 75
Coefficiente de Poisson ν	0,2 -0,25
Módulo de Distorção G (GPa)	26 – 33
Resistência à compressão (MPa)	400 – 1000
Resistência à tracção (MPa)	20 – 100
Resistência à flexão (MPa)	45

Quadro 2.1 – Propriedades mecânicas do vidro [21 e 6].

2.3.3 Propriedades térmicas

O vidro oferece resistência à passagem de calor (baixa condutividade térmica), isto é, se uma das arestas do painel aquece, o calor demora um certo tempo atravessar a espessura do painel e aquecer a outra aresta.

Durante o aquecimento rápido surgem compressões na superfície que previnem fissuras no vidro, ao contrário do arrefecimento brusco que causa a rotura térmica do vidro com o aparecimento de tracções. [22]

Se uma parte do vidro é aquecida lentamente também pode ser perigoso. Devido ao facto do vidro expandir quando é aquecido, e a parte que não foi aquecida tentar resistir à expansão, criam-se forças de tracção no vidro. Se estas forças forem superiores às forças admissíveis, o vidro parte.

A resistência ao choque térmico é a capacidade do vidro de resistir a uma brusca variação de temperatura sem o aparecimento de fissuras, pelo que, pode-se concluir que a resistência ao choque térmico é inversamente proporcional à dilatação térmica [1].

A dilatação térmica depende da composição química do vidro. Para vidros com a mesma constituição, quanto menor for a sua espessura, menor será a diferença de temperatura entre uma face e outra, o que implica o aumento da resistência ao choque térmico.

Para melhorar a resistência ao choque térmico do vidro podem ser aplicados dois recursos: a têmpera, em que as superfícies do vidro ficam comprimidas, sendo necessárias variações de temperatura superiores para eliminar o efeito de compressão e surgirem as forças de tracção; e a alteração da composição química do vidro, de modo que a expansão térmica seja menor quando aquecido [1].

As principais propriedades térmicas do vidro estão apresentadas no Quadro 2.2.

Condutividade térmica (W/m.K)	1
Calor específico C (J/Kg.K)	720
Coefficiente de expansão térmica α (1/K)	9×10^{-6}
Resistência ao choque térmico ΔT (K)	40

Quadro 2.2 - Propriedades térmicas do vidro segundo a Norma DIN EN572-1-2004 [7].

2.4 Tipos de vidro em relação ao seu processo de fabrico

A diversidade de vidros existente de vidros é muito extensa, dependendo dos seus constituintes químicos e dos tratamentos a que são submetidos. No entanto, nem todos têm resistência mecânica suficiente para serem utilizados como elemento estrutural na engenharia civil de forma a garantir a estabilidade e a segurança das estruturas.

Para esse efeito, têm sido desenvolvidos métodos para melhorar as características do vidro.

De seguida serão apresentados os tipos de vidros mais relevantes na construção contemporânea.

2.4.1 Vidro Float

O vidro float representa mais de 90% da produção de vidro plano, e é também considerado um vidro base para a produção de outros vidros sujeitos a um conjunto de tratamentos, de modo a melhorar o seu desempenho para uso estrutural.

Actualmente, o processo de fabrico deste vidro é baseado no método desenvolvido por Alastair Pilkington na década 50 em que, o vidro produzido exhibe melhores qualidades, tanto a nível superficial como ao longo da sua espessura e para além de ser mais económico.

Esta técnica, esquematizada, na Figura 2.14, consiste em colocar as matérias-primas num forno de fusão a 1500°C, passando por uma secção de condicionamento que se encontra dentro do forno, saindo aproximadamente a 1100°C, para um reservatório de estanho fundido [38].

O facto de o vidro ser menos denso que o estanho, faz com flutue sobre ele, formando duas faces planas e paralelas, daí a sua designação “float” [13].

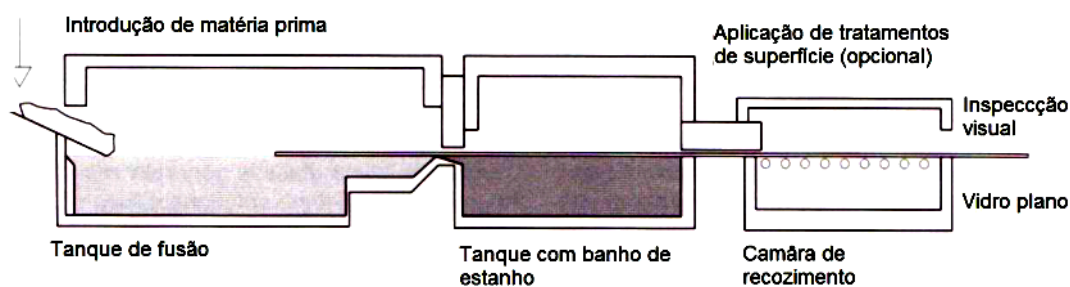


Figura 2.14 - Etapas do processo de fabrico do vidro float [21].

Posteriormente, quando atinge os 600°C, o vidro solidificado é transportado sobre um conjunto de rolos até forno de recozimento, denominado de Lehr (Figura 2.15), onde o painel vai arrefecer lentamente até aos 100°C, prevenindo assim o aparecimento de tensões térmicas residuais.



Figura 2.15 - Arrefecimento do vidro solidificado [23].

De seguida é feita a inspecção do vidro através de máquinas automatizadas, e por fim são cortados nas suas dimensões finais (Figura 2.16).



Figura 2.16 - Painel de vidro após arrefecimento e inspecção visual [23].

O tamanho máximo dos painéis é de 6 x 3,21 m. No entanto, para casos especiais é possível fabricar dimensões maiores [13].

No Quadro 2.3 estão apresentadas as espessuras disponíveis para o vidro float e as respectivas tolerâncias dimensionais [23].

Espessura do painel de vidro [mm]	Tolerância [mm]
2;3;4;5;6	$\pm 0,2$
8;10;12	$\pm 0,3$
15	$\pm 0,5$
19;25	$\pm 1,0$

Quadro 2.3 - Espessuras disponíveis para o vidro tipo float e as respectivas tolerâncias [23].

Este tipo de vidro, por questões de segurança, não pode ser utilizado para uso estrutural, uma vez que a sua rotura é excessivamente incerta, e quando se quebra, fragmenta-se em pedaços de grandes dimensões com arestas cortantes, como se pode ver na Figura 2.17.



Figura 2.17 - Fractura padrão do vidro recozido "float" [23].

Para melhorar o comportamento após rotura pode ser submetido a tratamentos térmicos, ou utilizar sistemas laminados, descritos nas subsecções seguintes.

2.4.1.1 Maquinação do vidro

O vidro antes de ser submetido a melhoramentos térmicos deverá ser cortado no tamanho e na forma desejada. Deve também ser feito o tratamento das respectivas arestas e ser furado para posteriormente serem efectuadas as ligações.

O posicionamento dos furos num painel de vidro deve respeitar as distâncias recomendadas entre furos e as arestas, como indicado na imagem abaixo.

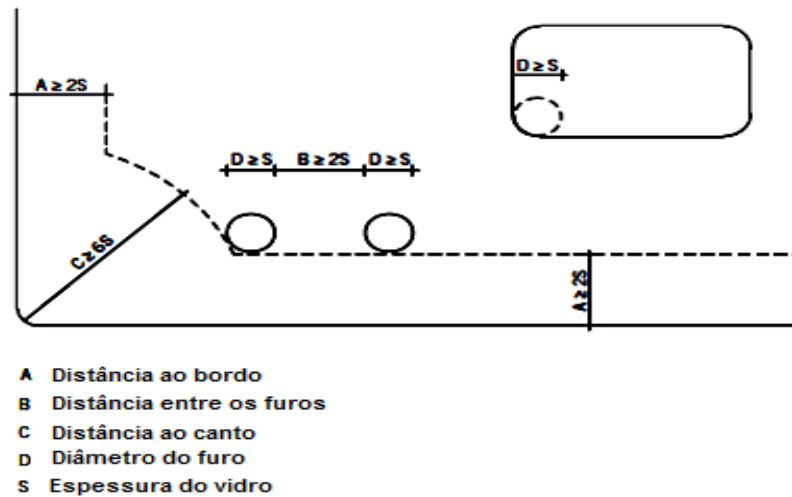


Figura 2.18 – Distâncias entre furos e arestas [23].

O diâmetro do furo deve ser no mínimo igual à espessura do painel de vidro, mas de preferência o dobro, sendo que os furos podem ser cilíndricos ou cônicos (Figura 2.19) [23].

Geralmente, estes painéis com furos são para ser submetidos ao processo de têmpera.

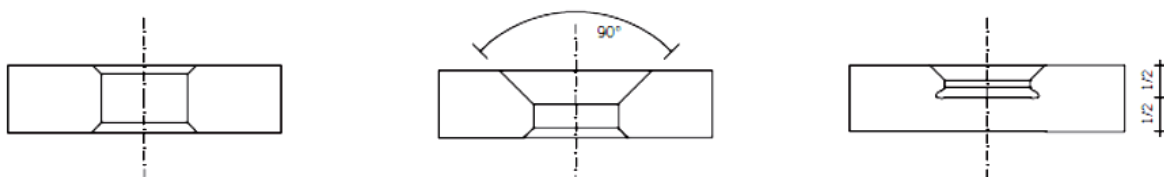


Figura 2.19 - Furos cilíndricos e cônicos [23].

2.4.2 Vidro Temperado

A têmpera é um processo capaz de alterar as características de fractura e de melhorar a resistência do vidro recozido (cerca de 5 vezes mais).

Pode ser realizada termicamente ou quimicamente.

O processo térmico consiste em aquecer novamente o vidro acima da sua temperatura de transformação (aproximadamente 650°C), e posteriormente ser submetido a um arrefecimento rápido com jactos de ar sobre ambas as faces como se encontra ilustrado na Figura 2.20 [9].

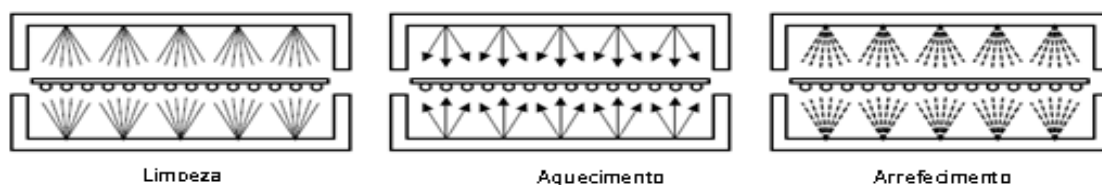


Figura 2.20 - Etapas do fabrico do vidro

Na produção do vidro, deverá ter-se algum cuidado com alguns compostos problemáticos, tal como o sulfato de níquel. Este, combinado com os outros constituintes durante a fusão, irá expandir. Juntamente com as tracções existentes no núcleo [13], poderá causar a rotura espontânea do painel durante o seu tratamento térmico [22].

Para evitar esse fenómeno, é recomendado submeter os painéis a um teste destrutivo “Heat Soak Test”, destinado a quebrar o vidro que apresenta risco de rotura espontânea [41].

Este teste consiste em aquecer lentamente o vidro até aproximadamente 300°C, mantendo esta temperatura por várias horas e depois diminuir gradualmente até 81°C [44].

Da têmpera térmica pode-se obter dois tipos de vidro: o vidro temperado e o vidro reforçado termicamente, consoante a sua velocidade de arrefecimento.

O vidro reforçado termicamente, que arrefece mais lentamente, desenvolve tensões internas menores e, por conseguinte tem uma resistência à tracção menor, do que o vidro totalmente temperado. Os valores aproximados da resistência à tracção destes dois vidros, comparativamente com o float, estão referidos no Quadro 2.4 [21].

Vidros	Resistência à tracção (MPa)
Float	50 MPa
Reforçado termicamente	110 MPa
Temperado	250 MPa

Quadro 2.4 - Resistência à tracção do vidro float, reforçado termicamente e temperado.

Devido ao facto do vidro ser um mau condutor de calor, a superfície do painel arrefece e consequentemente endurece mais rapidamente, ao contrário do que acontece ao seu interior que continua liquido arrefecendo lentamente [38].

Quanto mais lento for o arrefecimento maior será a densidade do vidro, levando assim o núcleo a contrair mais do que a zona superficial [38]. Porém, tal não é possível, pois as faces exteriores impedem que o núcleo encolha completamente, originando tensões internas com uma distribuição parabólica (Figuras 2.21 e 2.22) em toda a secção transversal: compressões nas superfícies (cerca de 20% de cada lado) equilibradas com tracções no seu interior (restantes 60%) [23].

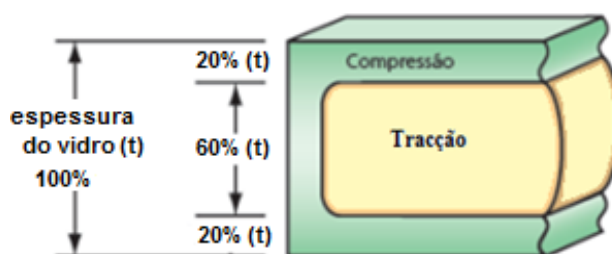


Figura 2.21 - Zonas de compressão e tracção na secção transversal do vidro temperado [43]

Para que seja possível esta distribuição de tensões na secção transversal, os painéis de vidro devem ter, no mínimo, 4mm de espessura [23], sendo que todos os tipos de vidro plano podem ser temperados. A têmpera térmica pode ser realizada horizontalmente ou verticalmente. No primeiro método, os vidros são transportados por roletes, evitando assim depressões circulares nas faces, que

surgem na têmpera vertical devido às pinças que sustentam o painel durante o processo. Estas depressões, como são típicas do vidro temperado, não são consideradas defeito de fabrico [15].

A têmpera horizontal permite fabricar painéis de grandes dimensões e de pequenas espessuras.

O painel de vidro temperado pode ser produzido com espessura até 19 mm (ocasionalmente 25 mm) e com uma área cerca de 2,50 m x 4 m, estas grandezas dependem das dimensões dos fornos de têmpera do fabricante. O vidro reforçado termicamente pode ser fabricado apenas até 12 mm de espessura. Presentemente, ambos os vidros com espessuras superiores a estes limites apresentam problemas de controlo de qualidade.

Segundo as normas EN572-1:2004; e prEN 13474-1:1999, a resistência característica à flexão dos vidros: recozido, vidro reforçado termicamente e totalmente temperado são as seguintes [23]:

Vidro	Resistência à Flexão (MPa)
Recozido	45
Termo-endurecido	70
Temperado	120

Quadro 2.5 - Resistência à flexão do vidro recozido, termo-endurecido e do temperado [23].

A distribuição e os valores máximos das tensões induzidas, dependem das propriedades do vidro usado e da geometria do objecto a ser temperado, bem como da temperatura a que o vidro foi submetido e da velocidade de arrefecimento [15].

Como geralmente a rotura ocorre por um defeito na superfície, a aplicação deste processo vai evitar agravamento dos defeitos presentes no vidro ou até mesmo o seu total desaparecimento. O aparecimento de tensões residuais de compressão na zona das fendas, limita o seu desenvolvimento desde que a solicitação aplicada não provoque tensões superiores as tensões residuais implementadas, de modo atingir o núcleo traccionado (Figura 2.22) [21].

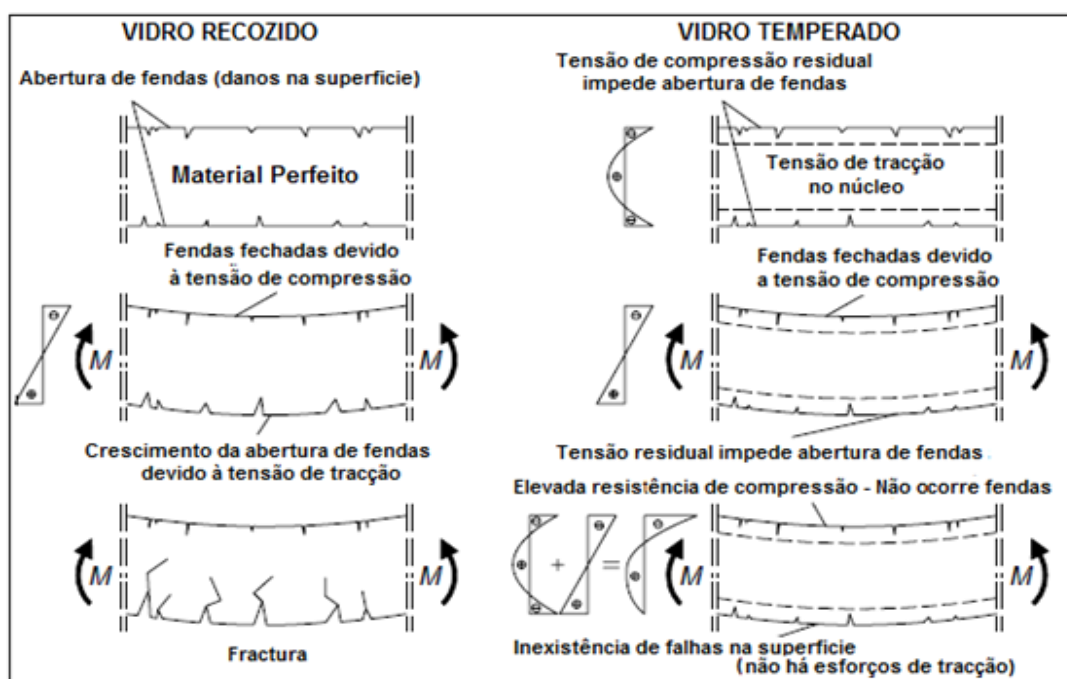


Figura 2.22 - Princípio da têmpera do vidro [10].

Este processo também melhora a resistência ao choque térmico do vidro, aumentando de 60°C (vidro recozido) para entre 240°C e 300°C [15].

O vidro temperado possui um comportamento único, quando atinge a rotura, estilhaça-se em pequenos fragmentos arredondados sem arestas cortantes e pontiagudas, minimizando o risco de acidentes (Figura 2.23 (a)) [15].

Por esta razão, é considerado um vidro de segurança. No entanto, após rotura, apresenta uma maior instabilidade estrutural relativamente ao vidro recozido, devido ao facto de ser mais difícil manter os fragmentos de menores dimensões sem caírem [21].

O tipo de fractura depende da quantidade de energia armazenada no vidro, isto é, devido às tensões residuais [11]. Quanto maior a energia acumulada, menores são os fragmentos.

O vidro reforçado termicamente, como tem o nível de pré-esforço mais baixo, comparado com vidro temperado, ao quebrar fragmenta-se em estilhaços maiores (ver Figura 2.23 (b)). Pelo mesmo raciocínio, o vidro float, apresenta assim uma menor fragmentação como se pode ver na Figura 2.23 (c) [13].

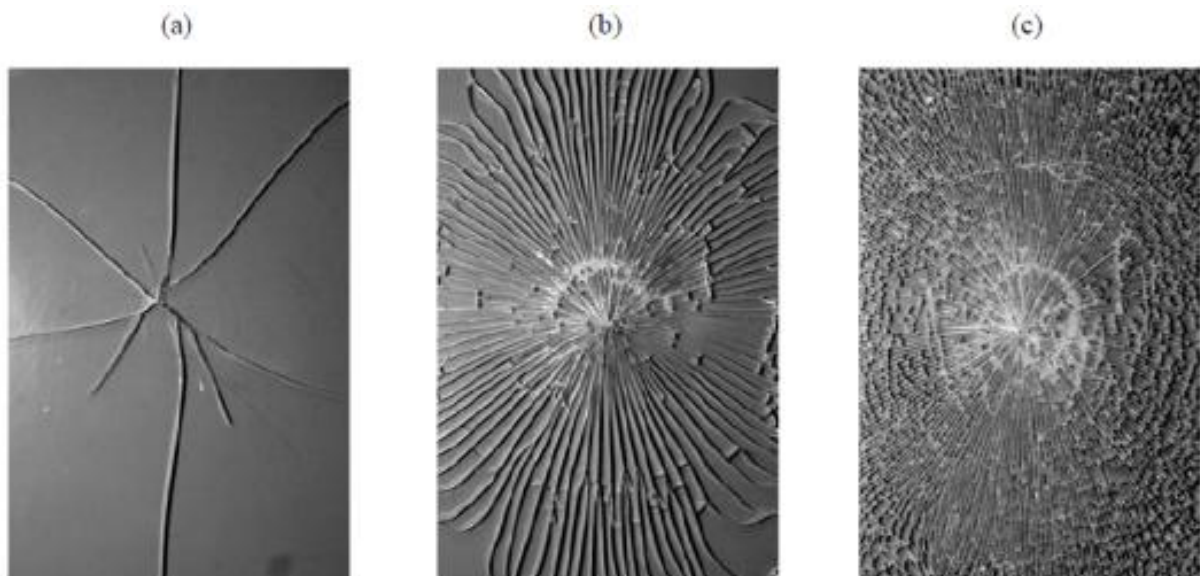


Figura 2.23 - Padrão de fractura do: (a) vidro recozido, (b) vidro termo-endurecido e (c) vidro totalmente temperado [13].

Após o acabamento, o vidro não pode ser trabalhado, cortado ou perfurado. Quando é necessário algum destes processamentos, deve ser feito antes, de modo a evitar o aparecimento de cortes e mossas, que podem provocar a quebra do vidro [22].

Para este tipo de vidro temperado, o conjunto de normas que se aplicam são as seguintes: EN 12150, EN 1863, e EN 14179.

Este vidro pode ser obtido também por têmpera química, sendo raramente utilizado na construção, excepto quando é necessário vidro com geometrias complexas. Este processo consiste em mergulhar o vidro num banho de nitrato de potássio. A maior parte dos iões de sódio, que são mais pequenos, vão ser substituídos por os iões de potássio, ficando a superfície com uma composição diferente da parte interna, surgindo compressões na superfície do painel [21].

Em comparação com a têmpera térmica, a resistência do vidro é cerca de duas ou três vezes maior e tem a vantagem de não possuir distorções devido as variações de temperatura, e permitir, caso necessário, um corte posterior ou perfuração.

Por outro lado, este processo possui alguns inconvenientes, tais como o facto de ser mais dispendioso, e de proporcionar uma menor segurança pois quando se quebra, os fragmentos resultantes são maiores e com arestas cortantes [15].

2.4.3 Vidro laminado

O vidro laminado é composto por dois ou mais painéis de vidro, unidos sob calor e pressão, por uma camada intermédia resistente e flexível (resina), combinando desta forma o vidro rígido, mas frágil com as características elásticas da resina (Figura 2.24).

O elemento intercalar normalmente utilizado é o PVB – polivinil butiral.

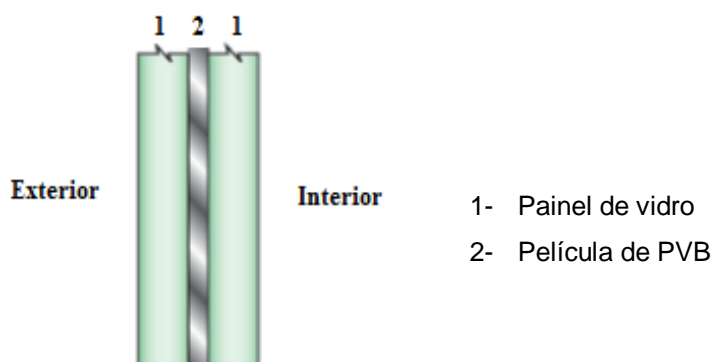


Figura 2.24 – Composição do vidro laminado.

A laminação é feita do seguinte modo: a camada de PVB é aplicada entre as chapas de vidro preparadas (cortadas, lavadas e secas), depois o conjunto é colocado numa estufa que facilita a aderência entre o vidro e o butiral. Posteriormente, o laminado é comprimido, de modo a expulsar o ar que ficou entre as duas chapas de vidro.

Finalmente, o conjunto é autoclavado, a 100°C, ficando os dois compostos firmemente unidos (Figura 2.25) [15].

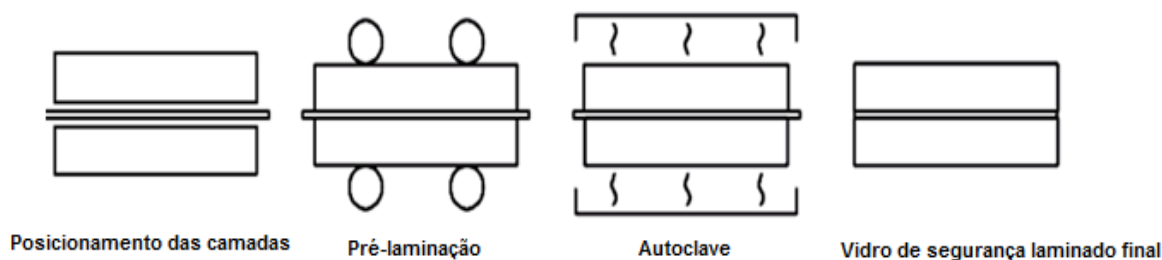


Figura 2.25 - Etapas de produção do vidro laminado.

Na imagem seguinte são apresentadas algumas soluções de vidro laminado:

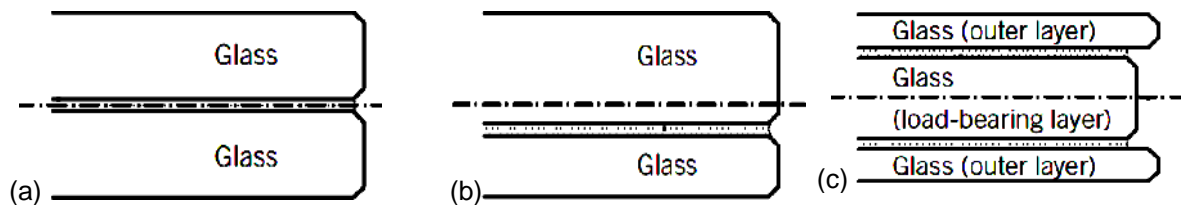


Figura 2.26 - Vidro laminado com: (a) – dois painéis de vidro com igual espessura; (b) – dois painéis de vidro com espessura diferente; (c) – três painéis de vidro com diferentes espessuras [23].

As normas que definem o vidro laminado são a ISO 12543, a EN 14449 e a EN12337.

Assim como o vidro temperado, este vidro também é denominado de vidro de segurança, pelo facto de ter uma rotura dúctil, isto é, em caso de rotura os estilhaços ficarão presos na camada intermediária de PVB, o qual pode alongado cinco vezes mais que a sua medida inicial sem rasgar, atenuando os danos e ferimentos [15].

Caso haja a quebra apenas de um dos painéis, o melhor vidro para constituir o vidro laminado é o recozido, isto porque seus fragmentos são maiores, aumentando capacidade resistente do elemento, resultando assim um melhor desempenho após a rotura, como está representado na imagem seguinte:

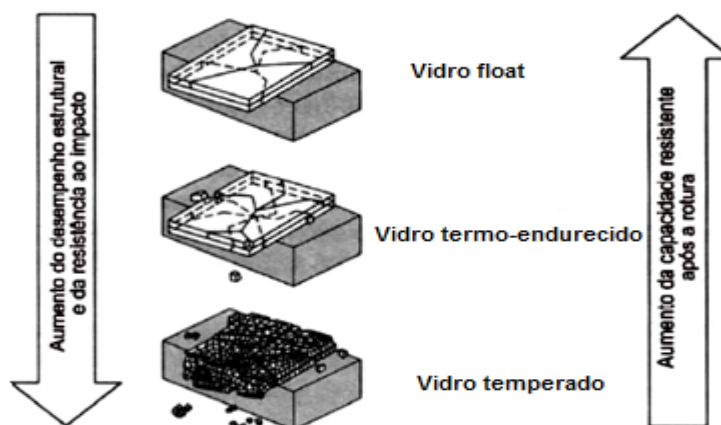


Figura 2.27 - Comportamento pós-rotura do vidro laminado composto

O comportamento pós-rotura também depende do material intercalar usado, que é geralmente formado por duas ou quatro folhas de PVB, tendo cada folha uma espessura de 0,38 mm.

Este elemento intermédio é dimensionado de acordo com a norma EN 12347-5 [23].

As suas propriedades físicas dependem principalmente da temperatura e da duração da carga e estão apresentadas no quadro seguinte [11]:

Massa volúmica ρ (Kg/m³)	1070
Módulo de distorção G (GPa)	0-4
Coefficiente de Poisson ν	0,5
Coefficiente de dilatação térmica α (1/K)	80×10^{-6}
Resistência à tracção (MPa)	≥ 20
Alongamento de rotura (%)	≥ 300

Quadro 2.6 - Propriedades físicas do PVB [11]

Recentemente, tem surgido materiais intermédios mais resistentes que o PVB, tais como o Sentry Glass. Este é formado por resinas ionoméricas da Dupont.

Com o desenvolvimento de materiais com melhores resistências mecânicas, podem obter-se estruturas mais esbeltas e com menor deformabilidade.

Por exemplo, na figura abaixo pode-se comparar o comportamento pós-rotura de um painel de vidro constituído por PVB e outro por Sentry Glass, ambos sujeitos a um carregamento de 330Kg.

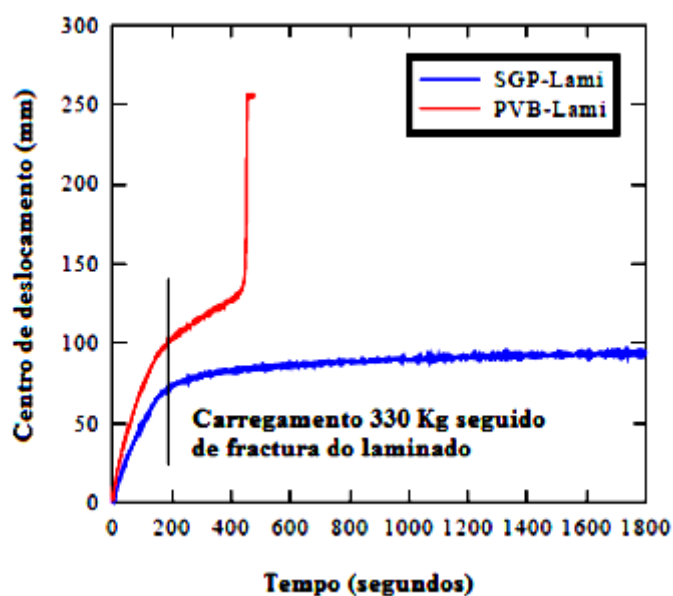


Figura 2.28 - Desempenho pós-rotura do vidro laminado constituído por PVB e por Sentry Glass [11].

Verifica-se que o comportamento do vidro laminado constituído por Sentry Glass tem um melhor desempenho após a rotura.

3. Regulamentação actual para estruturas em vidro

Em Portugal, em comparação com outros materiais de construção, a regulamentação existente para o dimensionamento de estruturas em vidro é muito escassa. Por esta razão, recorre-se habitualmente a normas internacionais.

A regulamentação actual ainda não abrange todos os tipos de situações possíveis em termos de sistemas de fixação, de geometria dos painéis de vidro e das várias configurações de carga.

Apenas se restringe ao caso em que o painel de vidro é rectangular, fixo continuamente em todo o seu contorno ou apenas em alguns bordos e sujeito a cargas uniformemente distribuídas [21].

Seguidamente são descritas, de forma resumida, algumas das normas necessárias para análise de estruturas em vidro.

3.1 Normas de certificação e Normas de ensaio do vidro

As normas de certificação e as normas de ensaio do vidro asseguram a qualidade dos vários tipos de vidro usados na construção civil e fornecem informação referente aos métodos de ensaio que permitem conhecer as propriedades intrínsecas dos diferentes tipos de vidro, respectivamente [21].

Este conjunto de normas é apresentado no Quadro A.1 do Anexo A.

3.2 Normas de dimensionamento

Para o uso do vidro como elemento estrutural este terá de ser correctamente dimensionado, para evitar problemas de estabilidade da estrutura. Ao contrário do vidro utilizado como material de preenchimento, que em nada influencia a sua estabilidade.

Em seguida são abordadas, de forma breve, as normas necessárias para determinar as acções que actuam sobre as estruturas de vidro e para verificar sua segurança, em termos de tensões e deformações, resultantes das acções aplicadas [11].

3.2.1 EN 1990 – “*Basis of structural design*”

A EN 1990 apresenta os princípios e os requisitos de segurança, de utilização e de durabilidade das estruturas, descrevendo as bases para o seu projecto e as verificações necessárias.

A verificação de segurança das estruturas deve ser feita em relação aos estados limites últimos (ELU) e em relação aos estados limites de utilização (ELUt).

O estado limite último está associado à capacidade máxima de suporte da estrutura quando sujeita a solicitações [8], estando verificada a segurança quando o esforço resistente é superior ao esforço actuante de cálculo.

O esforço actuante (E_d) é determinado com base nas seguintes combinações:

- Combinação fundamental (para situações persistentes e transitórias):

$$E_{d, fund} = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (3.1)$$

- Combinação acidental (para situações excepcionais como por exemplo: choque, incêndio, entre outros):

$$E_{d, acid} = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + P + A_d + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (3.2)$$

- Combinação sísmica:

$$E_{d, sism} = \sum_{j \geq 0} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + P_k + A_{Ed} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (3.3)$$

com:

A_d – Valor de cálculo de uma acção de acidente;

A_{Ed} – Valor de cálculo de uma acção sísmica $A_{Ed} = \gamma_I \cdot A_{Ek}$;

A_{Ek} – Valor característico de uma acção sísmica;

γ_I – Coeficiente de importância;

$\gamma_{G,j}$ – Coeficiente parcial para as acção permanente j (Quadro 3.1);

$G_{k,j}$ – Valor característico de uma acção permanente j;

$\gamma_{Q,1}$ – Coeficiente parcial relativo à acção variável de base (Quadro 3.1);

$\gamma_{Q,i}$ – Coeficiente parcial relativo das restantes acções variáveis i (Quadro 3.1);

$Q_{k,1}$ – Valor característico da acção variável base;

$Q_{k,i}$ – Valor característico das restantes acções variáveis i;

$\psi_{0,i}$ – Coeficiente de redução correspondente à acção variável (Quadro 3.2);

P – Valor representativo de uma acção de pré-esforço;

P_k – Valor característico de uma acção de pré-esforço.

O estado limite de utilização está relacionado com a durabilidade, aparência e o conforto da estrutura relativamente aos utilizadores. Para a sua verificação é preciso ter em conta as seguintes combinações:

- Combinação Característica – Estado limite de muito curta duração:

$$E_{d, caract} = \sum_{j \geq 0} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (3.4)$$

- Combinação frequente – Estado limite de curta duração:

$$E_{d, \text{freq}} = \sum_{j \geq 0} G_{k,j} + P + \Psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (3.5)$$

- Combinação quase permanente – Estado limite de longa duração:

$$E_{d, \text{qp}} = \sum_{j \geq 0} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (3.6)$$

em que:

$\Psi_{1,1}$ e $\Psi_{2,i}$ – Coeficientes de redução para as acções variáveis;

$G_{k,j}$ – Valor característico da carga permanente;

$Q_{k,i}$ – Valor característico das restantes acções variáveis i ;

$Q_{k,1}$ – Valor característico da acção variável base;

P – Valor representativo de uma acção de pré-esforço.

Os coeficientes parciais e os factores de redução estão apresentados nos Quadros 3.1 e 3.2 respectivamente, de acordo com a norma prEN-1374-1-1999.

Acções		Estado limite último		Estado limite de utilização	
		Acções permanentes (γ_G)	Acções variáveis (γ_Q)	Acções permanentes (γ_G)	Acções variáveis (γ_Q)
Desfavorável	Peso próprio, vento e neve	1,35	1,5	1,13	1,0
	Clima	1,35	1,2	1,13	0,92
Favorável	Todos	1,0	0	1,0	0

Quadro 3.1 – Coeficientes parciais para EL Último e EL Utilização segundo a norma prEN – 13474-1-1999].

	Estado limite último	Estado limite de utilização
	$\Psi_{0,i}$	
Curta duração	0,15	0,15
Vento	0,82	0,96
Interna*	0,60	0,60
*Só para elementos de vidro isolante		

Quadro 3.2 - Coeficientes de redução para EL Último e EL Utilização segundo a norma [prEN – 13474-1-1999]

O peso próprio do vidro sílico-sodo-cálcico é determinado de acordo com a sua espessura nominal e densidade, segundo a norma EN 572-1. Para o vidro laminado é determinado segundo a sua espessura nominal de acordo com a prEN ISO 12354-1.

Relativamente ao valor das acções, estas são calculadas de acordo com a EN 1991.

3.2.2 EN 1991 – “*Actions on structures*”

Esta norma fornece informações sobre todas as acções a considerar na projecção de estruturas. Para as fachadas em vidro estrutural, a acção mais condicionante é a do vento (EN 1991-4). Será apresentado no Anexo B, os procedimentos para a sua determinação.

3.2.3 prEN13474 – “*Glass in building – Design of glass panes*”

Tal como o título indica, esta norma europeia tem por objectivo estabelecer os procedimentos necessários para o dimensionamento de painéis de vidro.

Esta norma não abrange todas as acções a que o vidro está sujeito, tais como a resistência à acção sísmica, resistência ao impacto, resistência à explosão.

Encontra-se dividida em cinco partes:

Parte 1 – Conceitos gerais do dimensionamento;

Parte 2 – Painéis sujeitos a cargas uniformemente distribuídas;

Parte 3 – Painéis sujeitos a cargas lineares;

Parte 4 – Painéis sujeitos a cargas concentradas;

Parte 5 – Painéis sujeitos a cargas sobrepostas.

Actualmente ainda só foram publicadas as duas primeiras partes.

Na primeira parte são dadas informações para o dimensionamento dos painéis de vidro, necessárias para resistir cargas perpendiculares à sua superfície. Através de coeficientes parciais, pode-se verificar a segurança dos painéis de vidro pelo cálculo da tensão efectiva admissível.

A segurança dos elementos de vidro está verificada caso:

$$\sigma_{\text{eff}} \leq f_{g;d} \quad (3.7)$$

em que:

σ_{eff} – Tensão efectiva actuante;

$f_{g;d}$ – Tensão efectiva admissível.

Como já foi referido em capítulos anteriores, o vidro é muito sensível à tracção.

Em grande parte dos problemas de dimensionamento são as tensões principais de tracção na superfície do vidro que determinam a probabilidade de fractura.

A fractura do vidro não é necessariamente desencadeada pela máxima tensão de tracção presente na sua superfície, mas sim num ponto em que seja relativamente alta e coincidente com um defeito na superfície relativamente grande.

A tensão efectiva actuante é o valor médio ponderado da distribuição de tracções na superfície do painel, que é determinada para a combinação de acções mais desfavorável da seguinte forma:

$$\sigma_{\text{eff}} = \left[\frac{1}{A} \int \{\sigma_1(x,y)\}^\beta dx dy \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (3.8)$$

com:

A – Área total de vidro sobre a qual actua a acção;

$\sigma_1(x,y)$ – Tensão principal de tracção que actua no ponto (x,y) para a respectiva acção actuante;

β – Parâmetro de forma da tensão de rotura, retirado da distribuição estatística de Weibull.

Nos casos em que seja difícil estimar o valor de σ_{eff} pode ser usado o seu valor máximo, σ_{max} .

A tensão efectiva admissível é determinada através das seguintes expressões:

- Para o vidro float

$$f_{g;d} = \left(k_{\text{mod}} \times \frac{f_{g,k}}{Y_M \times k_A} \right) \times Y_n \quad (3.9)$$

- Para o vidro temperado

$$f_{g;d} = \left(k_{\text{mod}} \times \frac{f_{g,k}}{Y_M \times k_A} + \frac{f_{b,k} - f_{g,k}}{Y_V} \right) \times Y_n \quad (3.10)$$

com:

k_{mod} – Coeficiente parcial que tem em conta a duração do carregamento, a combinação de cargas e as condições ambientais (Quadro C.3 - Anexo C);

$f_{g,k}$ – Valor característico da tensão do vidro recozido (45MPa) e depende da composição química do vidro;

Y_M – Coeficiente parcial que depende da resistência do vidro (Quadro C.4 - Anexo C);

k_A – Coeficiente que contabiliza a área do vidro (A) (Quadro C.2 - Anexo C) e pode ser determinado da seguinte forma $k_A = A^{0,04}$;

$f_{b,k}$ – Valor característico da tensão do vidro pré-esforçado (Quadro C.1 - Anexo C);

Y_V – Coeficiente parcial para a tensão residual devido à têmpera (Quadro C.4 - Anexo C);

Y_n – Coeficiente parcial nacional (depende do país – (Quadro C.5 - Anexo C)).

Em termos de deformação admissível, não há nenhuma norma ou regulamento para limitar a deformação do vidro quando sujeito a solicitações. No entanto, caso exista, pode ser admitido os limites de deformação fornecidos pelo fabricante.

A determinação do estado de tensão e de deformação de dimensionamento do vidro, deve ser feita com base no valor característico da carga de dimensionamento, F_d , como já foi referido, segundo a norma ENV1991.

Estes valores devem ser determinados tendo em conta a distribuição de carga, a geometria do vidro e as condições de suporte e podem ser calculados através de uma análise linear, excepto se o valor da flecha máxima w_{max} for superior a metade da espessura do vidro, podendo nesse caso ser determinados com uma análise geometricamente não linear.

Em termos de deformação, se existir alguma limitação, a flecha máxima para a situação mais condicionante não pode exceder a flecha admissível:

$$w_{max} \leq w_d \quad (3.11)$$

3.2.4 ASTM E1300 – “Standard of Practice for Determining Load Resistance of Glass in Buildings”

Esta norma norte-americana é indicada para o dimensionamento de painéis de vidro com geometria rectangular (monolíticos, laminados ou vidros duplos) suportados continuamente em pelo menos um bordo. É aplicável em envidraçados verticais ou inclinados e permite determinar a carga resistente do vidro.

A verificação de segurança é feita da seguinte forma:

$$q \leq LR = NFL \times GTF \quad (3.8)$$

com:

q – Valor da carga lateral de dimensionamento;

LR – valor da carga resistente;

NFL – Valor característico da carga resistente, para uma carga a actuar durante 3 segundos e com uma probabilidade de rotura de 0,008, e depende da geometria, tipo de apoio e espessura do painel de vidro (Quadro D.2 - Anexo D);

GTF – coeficiente que depende do tipo de vidro e da duração da carga (Quadro D.1 - Anexo D).

4. Sistemas de Fixação

A leveza e a transparência que o vidro proporciona nas estruturas, faz dele um material único e insubstituível na arquitectura. Contudo, os engenheiros ficam muito hesitantes em aplicá-lo como elemento estrutural, devido à sua fragilidade [2]. Mas com os aperfeiçoamentos das últimas décadas, em termos de resistência do vidro e de sistemas de fixação específicos, hoje em dia é viável obter fachadas em vidro estrutural dispensando o uso de caixilhos tradicionais, permitindo uma maior interacção entre o interior e o exterior com a criação de fachadas totalmente transparentes [16].

Actualmente, com o avanço da tecnologia, surgiram diversos sistemas de fixação dos painéis de vidro em fachadas, com a finalidade de obter a máxima transparência e valorização estética dos edifícios [17].

Pode-se considerar a existência de dois sistemas de fixação globais, os mecânicos e os aderentes, apesar de alguns sistemas de fachadas implicar em o uso dos dois em simultâneo.

De forma concisa, são descritos e apresentados alguns exemplos de cada um [21].

4.1 Fixações aderentes

Este tipo de fixação permite a ligação entre os painéis de vidro e o material de suporte através de materiais adesivos ou silicones estruturais.

Actualmente este tipo de fixação também é muito usado nos sistemas pontuais e nos contínuos [21].

A força de aderência pode ser influenciada por diversos factores tais como características mecânicas do sistema, do tipo e duração da solicitação, a geometria da ligação adesiva, o estado das superfícies aderir, assim como as condições ambientais a que está sujeita [23].

Neste tipo de ligações as tensões são transmitidas uniformemente, ao contrário das fixações aparafusadas de onde resultam grandes concentrações de tensões pontuais, às quais o vidro é bastante sensível, devido à sua elevada fragilidade [21].

Para além desta vantagem, o sistema permite obter uma superfície plana e fácil de limpar [11].

Estas conexões aderentes podem ser classificadas em flexíveis ou rígidas [23].

4.1.1 Fixações aderentes flexíveis

Hoje em dia, o silicone estrutural é utilizado para criar uma vedação de borracha flexível entre vidro/vidro e vidro/aço para absorver os esforços devidos às solicitações que a fachada está sujeita, garantindo que as suas características permanecem inalteradas por muitos anos [29].

Como exemplo da sua aplicação tem-se o vidro exterior colado (VEC), desenvolvido nos anos 80, em que o silicone é usado para colar os painéis de vidro a uma subestrutura metálica, cuja função é transferir o peso próprio dos painéis e os esforços devidos às acções climáticas entre os painéis e a

estrutura de metálica de suporte, que se encontra no interior (Figura 4.1). O silicone torna-se assim um elemento estrutural que, proporciona uma maior transparência das fachadas.

O vidro exterior colado também poderia estar inserido nos sistemas de fixação mecânicos contínuos, mas como é o silicone estrutural que transmite os esforços provenientes dos painéis de vidro aos suportes metálicos, faz mais sentido pertencer a este grupo.



Figura 4.1 - Vidro exterior colado [32].

Devido ao facto do silicone possuir uma elevada elasticidade, permite a dilatação e contracção do vidro, sem efeitos secundários negativos, para além de assegurar a estanqueidade da estrutura [25].

Existem dois tipos de silicone, o silicone de um só componente e o de vários componentes. No primeiro, a cura começa no instante em que entra em contacto com o ar e humidade, e o seu tempo de cura depende da espessura do silicone [21].

As condições mais adequadas para a sua aplicação são a uma temperatura ambiente de 24°C e com uma humidade relativa no mínimo de 50%.

A espessura recomendada é no mínimo de 6 mm e no máximo de 20 mm, pois se a junta for muito larga, o seu interior não cura totalmente [11].

No caso do silicone de dois componentes (90% do volume de um composto base e os restantes 10% de um catalisador), a cura inicia-se quando se junta os dois elementos, demorando apenas 3 dias a completar [21].

A duração do tempo de cura é independente da espessura da junta. A espessura mínima recomendada é de 6 mm e a máxima de 50 mm [11].

O baixo módulo de elasticidade permite uma distribuição de tensões uniforme, evitando concentrações. Contudo para elevadas tensões de corte, estes silicones já não são adequados.

As juntas devem ser dimensionadas de forma a garantir a capacidade de transmissão de esforços, não excedendo a sua tensão admissível.

Para garantir o funcionamento correcto da junta, deve-se ter em conta a compatibilidade química entre o silicone e o material com o qual estará em contacto.

Os valores de tensão geralmente disponibilizados, consideram apenas que a rotura do silicone ocorre somente por perda de coesão (resistência do silicone). E que a perda de aderência está limitada com aplicação de produtos nas superfícies dos materiais.

No caso do vidro, alumínio e aço, como não apresentam superfícies porosas, estes materiais apresentam uma boa superfície de aderência. [21]

Este silicone também é utilizado em sistemas de fixação mecânicos contínuos, por exemplo em fachadas tipo cortina.

4.1.2 Fixações aderentes rígidas

Estes adesivos como possuem maior resistência e rigidez que os silicones estruturais, permitindo criar juntas com menores dimensões, garantindo também a resistência necessária.

Os mais usados são os adesivos epóxicos e os adesivos acrílicos.

Os adesivos epóxicos são adesivos de preenchimento que admitem espessuras de juntas superiores a 5 mm, enquanto os adesivos acrílicos são adesivos de contacto que permitem espessuras de juntas inferiores a 1 mm.

Como consequência da elevada rigidez, a distribuição de esforços e absorção de deformações é mais difícil comparado com o silicone estrutural, por essa razão deve-se ter algum cuidado com a geometria da junta, de modo a evitar pontos de singularidade e arestas pontiagudas que conduzam a concentração de tensões.

Estes adesivos estruturais são muito utilizados na indústria aeronáutica e automóvel, mas no campo da construção ainda não foram muito desenvolvidos [11].

4.2 Fixações mecânicas

A leveza que o aço proporciona às estruturas devido à sua alta resistência, faz com que este tipo de sistemas seja o mais utilizado em fachadas.

Como o aço está exposto, seja no exterior ou até mesmo no interior do edifício, terá de ser devidamente protegido contra a corrosão [12].

Estes tipos de fixações podem ser subdivididos nos seguintes grupos:

4.2.1 Fixações contínuas

Este tipo de fixação consiste em suportar os painéis de vidro em torno do seu perímetro ou apenas em dois ou três lados, com recurso a caixilharias.

Um exemplo deste sistema é a tradicional janela ou o sistema de fachada cortina, que surgiu nos anos 70, no qual o peso próprio é transmitido à armação por intermédio de calços de apoio colocados na aresta inferior, e os esforços devidos ao vento são transmitidos à estrutura principal através de uma estrutura portante que se encontra fixa aos caixilhos.

O contacto vidro/metal é impedido pelas juntas de silicone ou de juntas de borracha etileno-propileno-dieno (EPDM). Tanto na horizontal como na vertical é colocado uma tampa exterior como está mostrado na Figura 4.2 [21].

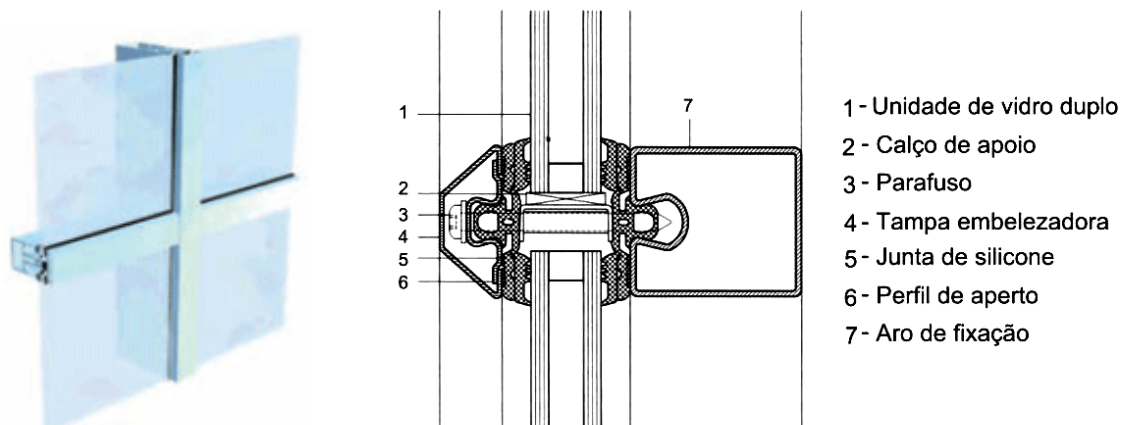


Figura 4.2 - Sistema de fixação contínuo – fachada cortina [8 e 13].

4.2.2 Fixações Pontuais

Neste tipo de sistema, os painéis de vidro são fixos pontualmente à estrutura de suporte, sendo evitado o contacto directo entre o vidro e o metal, com materiais intermédios. Comparativamente ao sistema de fixação anterior, este método é mais importante, pelo facto da quantidade de material de apoio necessário ser significativamente menor, permitindo desta forma uma maior transparência da fachada [21].

Podem-se considerar dois tipos de fixações pontuais, por aperto e as aparafusadas.

4.2.2.1 Fixações pontuais por aperto

As fixações pontuais por aperto podem ser feitas através de grampos ou por fixações aparafusadas. No primeiro caso, a fixação é constituída por grampos, calços de apoio e por uma borracha EPDM ou neoprene, para evitar o contacto entre o vidro e o metal (Figura 4.3).

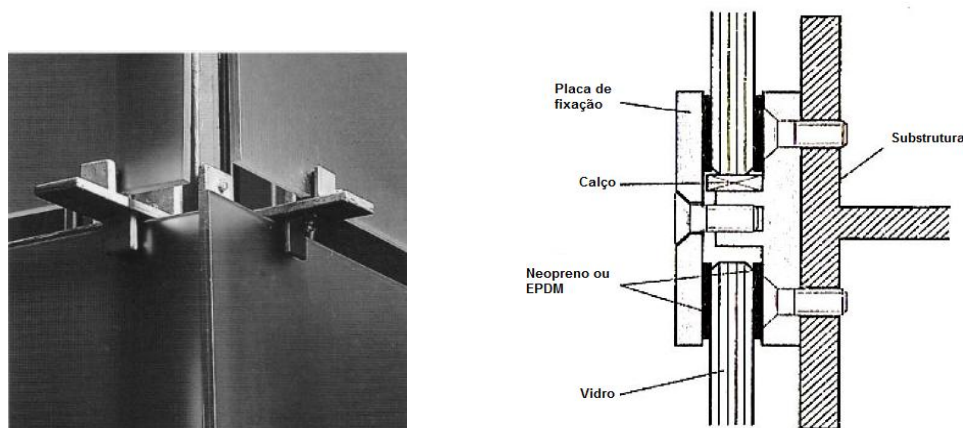


Figura 4.3 - Fixação pontual de aperto [21] e [11].

Este tipo de fixação é usado para transferir cargas que actuem perpendicularmente à fachada de vidro.

As fixações aparafusadas, em vez de grampos, usam parafusos pré-esforçados, de modo a garantir a resistência ao corte e para permitir a transferência de cargas que actuam no plano da fachada.

Neste caso, o material intermédio entre a chapa metálica de aperto e o vidro são juntas de alumínio ou fibra de vidro, e os furos são feitos com folga também de forma a evitar esse contacto.

Um exemplo desta aplicação é o “Glass fins” (Figura 4.4) [21].

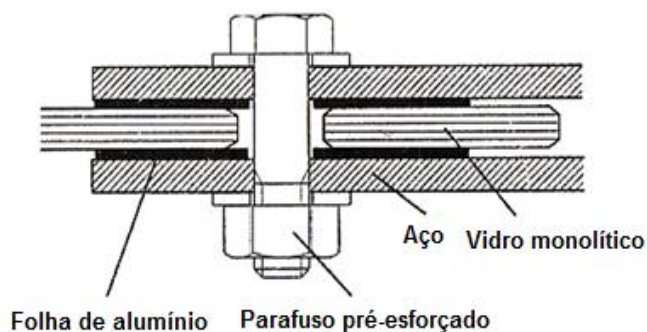


Figura 4.4 – “Glass fins” [6].

Os painéis de vidro são ligados uma subestrutura também em vidro perpendicular à fachada para absorver as cargas da acção do vento, através de silicões ou aranhas pontuais.

Este tipo de fixação por aperto distribui melhor a carga pela área do painel de vidro, evitando assim grandes concentrações de tensões [21].

4.2.2.2 Fixações pontuais aparafusadas

As fixações pontuais aparafusadas são o tipo de sistema de fixação mais procurado, na medida em que permite obter fachadas com máxima transparência e estética com a mínima quantidade de aço.

Este tipo de sistema consiste em suportar os painéis de vidro e os esforços devidos às cargas climáticas, através de dispositivos de fixação ligadas a uma estrutura portante.

Estas fixações atravessam totalmente o vidro, podendo deixar ou não relevo na superfície exterior da fachada (Figura 4.5).

As que deixam relevo na parte exterior são as mais apropriadas para a transferência de esforços no plano da fachada, sendo por esta razão mais utilizadas para dar continuidade a elementos que estão limitados pelas suas dimensões como por exemplo “glass fins” e vigas, ao contrário das sem relevo que são apenas usadas como pontos de suporte [21].

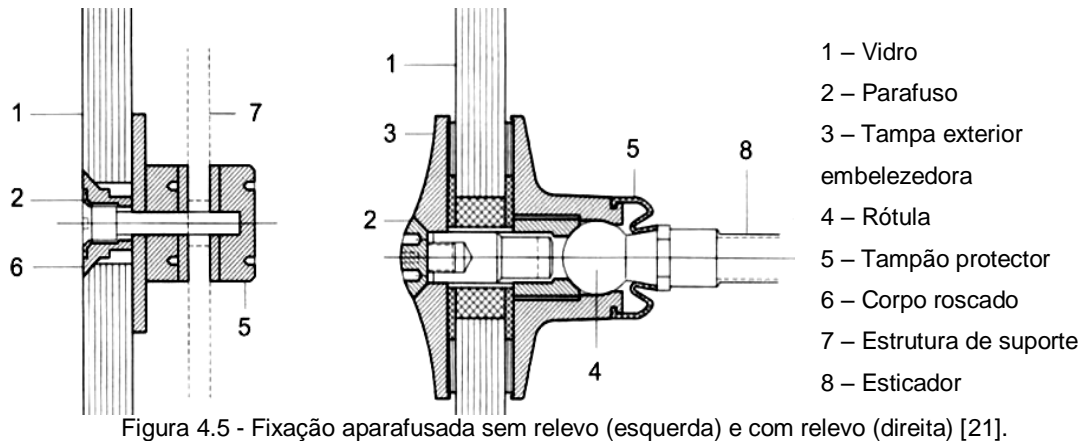


Figura 4.5 - Fixação aparafusada sem relevo (esquerda) e com relevo (direita) [21].

Contudo, na zona dos furos existiram elevadas concentrações de tensões e como o vidro é um material frágil, não permite a sua redistribuição. Por isso, entre o vidro e aço deverá ser colocado um material intermédio para evitar essas concentrações de tensões [21].

Um exemplo bastante importante deste tipo de fixação é o vidro exterior agrafado também conhecido por “Spider Glass”, sobre o qual, será feito um estudo mais detalhado.

O vidro exterior agrafado surgiu nos meados dos anos 70 e tem como finalidade suportar pontualmente os painéis de vidro, transmitindo os esforços devidos ao peso próprio dos painéis e às acções climáticas à estrutura portante, ao contrário do que acontecia nos sistemas tradicionais em que o painel de vidro era suportado por apoios contínuos em todo o seu contorno [17].

4.2.2.2.1 Constituição

Este sistema inovador é composto por um conjunto de componentes como está representado na Figura 4.6.

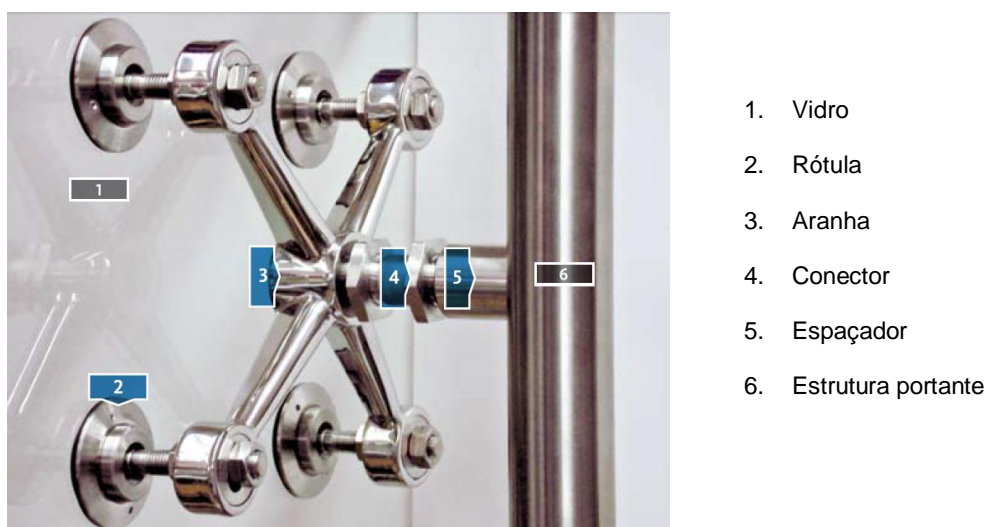


Figura 4.6 - Constituintes do sistema “ vidro exterior agrafado “ [6].

Os acessórios metálicos normalmente são de aço, material dúctil, com capacidade de se deformar sem perder a resistência e com um preço relativamente baixo [3].

Nas subsecções seguintes estes constituintes vão ser analisados mais pormenorizadamente.

4.2.2.2.1 Vidro

Os painéis de vidro são furados e fixos através de aranhas à estrutura de suporte, podendo ser monolíticos, laminados ou duplos.

Na escolha do tipo de vidro mais apropriado para este sistema de fixação, terá de se ter em conta qual o mais resistente e mais seguro para os utilizadores em caso de quebra.

O mais adequado é o vidro temperado que já foi analisado de forma detalhada na subsecção 2.4.2. Este porque tem capacidade de suportar grandes concentrações de tensões que se originam na zona dos furos, onde se localizam as aranhas e são os mais indicados para locais sujeitos a choques térmicos ou condições adversas que requeiram resistência mecânica.

Como já foi referido, o vidro temperado pode sofrer uma quebra espontânea, e os fragmentos apesar de serem pequenos e arredondados, se caírem de uma altura elevada podem causar ferimentos.

Contudo, o vidro laminado tem um melhor comportamento pós-rotura, na medida em que os fragmentos ficam juntos ao PVB, proporcionando assim uma melhor segurança às pessoas. Mas este só pode ser usado, se pelo menos um dos painéis de vidro for temperado, como se pode ver pelo quadro seguinte:

Tipo	Natureza dos componentes	Fachadas verticais	Fachadas Inclinadas
Monolítico	Temperado	Sim	Não
	Endurecido	Não	Não
	Recozido	Não	Não
Laminado	Temperado/Temperado	Sim, se a fixação atravessar os dois componentes	
	Temperado/Endurecido	Sim, se a fixação atravessar pelo menos um dos componentes	
	Temperado/Recozido	Sim, se a fixação atravessar pelo menos um dos componentes	
Vidro duplo isolante	Temperado/temperado	Sim, se a fixação atravessar os dois componentes	Sim, o componente interior for laminado e se a fixação atravessar todos os constituintes do laminado
	Temperado/Endurecido	Sim, se o endurecido for laminado e a fixação atravessar o componente	
	Temperado/Recozido	Sim, se o recozido for laminado e a fixação atravessar o componente	
	Endurecido/Endurecido	Sim, se os dois componentes forem laminados	
	Endurecido/recozido		
	Recozido/Recozido		

Quadro 4.1 -Tipos de vidros adequados para o sistema “Spider Glass” [21].

Para este sistema as máximas dimensões dos painéis de vidro são de 4,0 m, pois não existem fornos de têmpera com tamanhos maiores nem condições para fazer a laminação de painéis maiores.

O vidro quando sujeito a variações de temperatura contrai e dilata. Por esta razão, para evitar a sua fractura, não deve haver contacto directo entre os painéis.

Este afastamento deve ser no mínimo de 3,0 mm, podendo estar ou não preenchido com silicone.

O aconselhável é estar vedado, de modo a ser estanque ao ar e a água.

4.2.2.2.1.2 Aranha

As aranhas mantêm os vidros afastados da estrutura de fixação e podem ser de dois tipos de materiais: aço inoxidável ou alumínio [3].

A sua forma lembra uma aranha, daí a sua designação de Spider Glass, e na sua extremidade possuem parafusos – rótulas. Estas são usadas para transmitir as cargas aplicadas sobre os painéis de vidro para a estrutura de suporte ou de um vidro para o outro.

Existem diversos tipos de aranhas que dependem do número de painéis a grafar e do tipo de aço. Nas figuras abaixo estão apresentados alguns exemplos [16].



Figura 4.8 - Modelo 1 - Aranhas de aço inoxidável AISI 316 com 4,3,2,1 braços respectivamente [65].



Figura 4.7 - Exemplo de aplicação do modelo 1 de aranha [16].



Figura 4.9 - Modelo 2 - Aranha em aço de alta resistência GGG-50 DIN-1693 [16].



Figura 4.10 - Exemplo de aplicação do modelo 2 de aranha [16].



Figura 4.11 - Modelo 3 - Aranha em aço de alta resistência GGG-50 DIN-1693 [16].



Figura 4.12 - Exemplo de aplicação do modelo 3 de aranha [16].



Figura 4.14 - Modelo 4 - Aranha em aço de alta resistência GGG-50 DIN-1693 [16].



Figura 4.13 - Exemplo de aplicação do modelo 4 de aranha [16].



Figura 4.16 - Modelo 5 - Aranha em aço de alta resistência GGG-50 DIN-1693 [16].



Figura 4.15 - Exemplo de aplicação do modelo 5 de aranha [16].

4.2.2.1.3 Rótula

Os parafusos possuem rótulas que são peças de aço inoxidável que tornam o sistema flexível, permitindo a flexão e a dilatação do plano de vidros, quando sujeito a condições meteorológicas adversas, evitando desta forma o aparecimento de possíveis tensões [3], sendo, desta forma possível obter planos maiores.

Os tipos de rótulas dependem do tipo de vidro e são fabricadas de modo a evitar eventuais actos de vandalismo [3]. São mostrados alguns exemplos nas figuras seguintes.



Figura 4.17 - Rótula em aço inox para vidro temperado entre 10 e 15mm - furo cônico [6].



Figura 4.18 - Rótula com tampa cônica de aperto exterior para vidro temperado 10 a 16mm – furo cônico [6].



Figura 4.19 - Rótula em aço inox de tampa de aperto exterior para vidro laminado/temperado 12 a 26mm – furo cilíndrico [6].



Figura 4.20 - Rótula em aço inox para fachada em vidro duplo temperado 28 a 36mm – furo cônico [6].



Figura 4.21 - Rótula em aço inox para vidro duplo temperado 28 a 36mm – furo cilíndrico [6].

As rótulas para evitar o contacto directo aço/vidro possuem um material intermédio com módulo de elasticidade inferior ao do vidro para evitar concentrações de tensões nas zonas dos furos. Os materiais utilizados para este efeito são por exemplo resina ou argamassa injectada ou plástico com por exemplo EPDM (etilenopropileno-dieno), PEEK (poliéter-éter cetona) ou POM (polioximetileno), que são fortes e rígidos o suficiente para a transferência de carga não provocar a fractura do vidro e ao mesmo tempo suficientemente suaves para admitir a redistribuição de tensões nestes pontos [11].

Em fachadas verticais, os painéis de vidro ficam pendurados e flexíveis, porque o peso dos painéis é suportado apenas pelos parafusos superiores, para tal os furos inferiores terão de ser folgados de modo a permitir a compensação das tolerâncias dimensionais e dos movimentos diferenciais.

Todos os parafusos suportam o peso dos painéis, caso eles sejam colocados numa posição inclinada [3].

4.2.2.2.1.4 Mástique

Os painéis não podem estar em contacto directo, de forma a permitir a sua livre dilatação e contracção sem quebrarem, estando as juntas entre eles preenchidas com mástique, com função de assegurar a estanquidade da estrutura ao ar e água [27] e transferir os esforços dos painéis devidos às solicitações para o seu suporte [16].

Existem diversos tipos de mástique, mas nem todos são apropriados para este fim, na medida em que este deve ser compatível com o material adjacente [16] e possuir elasticidade suficiente para possibilitar a dilatação e contracção do vidro quando sujeito a acções climáticas [27].



Figura 4.22 - Juntas de mástique.

O mástique mais adequado é um silicone de reticulação acética transparente ou colorido, sem solventes com as características descritas no quadro no Anexo E [34].

Devido ao efeito da humidade, o mástique reticula e torna-se elástico. A reticulação começa à superfície e continua em profundidade [14].

Tem uma excelente durabilidade e aderência ao vidro, e fácil aplicação em superfícies horizontais e verticais.

O mástique deve apenas aderir às faces laterais das juntas para que possa alongar e comprimir livremente e deve ser dimensionado de modo que o seu alongamento máximo não ultrapasse os 20%.

4.2.2.2.1.5 Estrutura Portante

Neste tipo de sistema, as aranhas encontram-se ligadas a uma estrutura portante, a qual possibilita a transferência de esforços para a estrutura do edifício ou directamente para as fundações [21].

Esta geralmente é de aço para permitir uma integração perfeita com a estética da fachada, podendo ser composta por perfis metálicos ou cabos pré-tensionados [16].

Os perfis metálicos são elementos esbeltos que permitem obter estruturas leves e transparentes.

Estes são sujeitos aos esforços verticais devidos ao peso próprio da estrutura e aos esforços horizontais devidos à acção do vento.

A secção destes perfis pode ser aberta ou fechada. Os perfis de secção fechada possuem menos área de superfície em comparação com os perfis de secção aberta, ou seja, menos área que terá de se proteger contra a corrosão, ficando desta forma mais económico.

Para além desta vantagem, os perfis de secção fechada com geometria quadrada e rectangular, como têm superfícies planas, as ligações são mais facilitadas.

Para além disso, os perfis tubulares são os que apresentam uma melhor resistência à compressão e à torção (Figura 4.23) [28].



Figura 4.23 - Exemplo de fachada suportada por perfis tubulares [28].

Os painéis de vidro são fixados pelas aranhas, as quais são ligadas aos perfis através de espaçadores metálicos.

Fachadas altas ou construídas com elementos estruturais esbeltos devem ser contraventadas, de forma a evitar fenómenos de instabilidade.

Neste tipo de sistema de fixação, o contraventamento é, normalmente, feito por cabos tensionados cruzados em X, dispostos horizontalmente, em que o tensionamento é garantido por esticadores nas suas extremidades [12].

O uso de cabos pré-tensionados em fachadas envidraçadas permite alcançar a máxima desmaterialização da estrutura vencendo alturas maiores, tornando-as mais leves e com melhor controle da deformação [21].

Os cabos são elementos que suportam apenas esforços de tracção, neste tipo de sistemas suportam o peso próprio e os esforços devidos à acção do vento.

Como já foi referido no caso anterior, para fachadas altas, além destes elementos verticais, terá de existir contraventamento de cabos horizontais para evitar grandes deformações dos painéis de vidro [12].

Existe diversas soluções de traçados de cabos, na Figura 4.24 estão apresentados alguns exemplos.

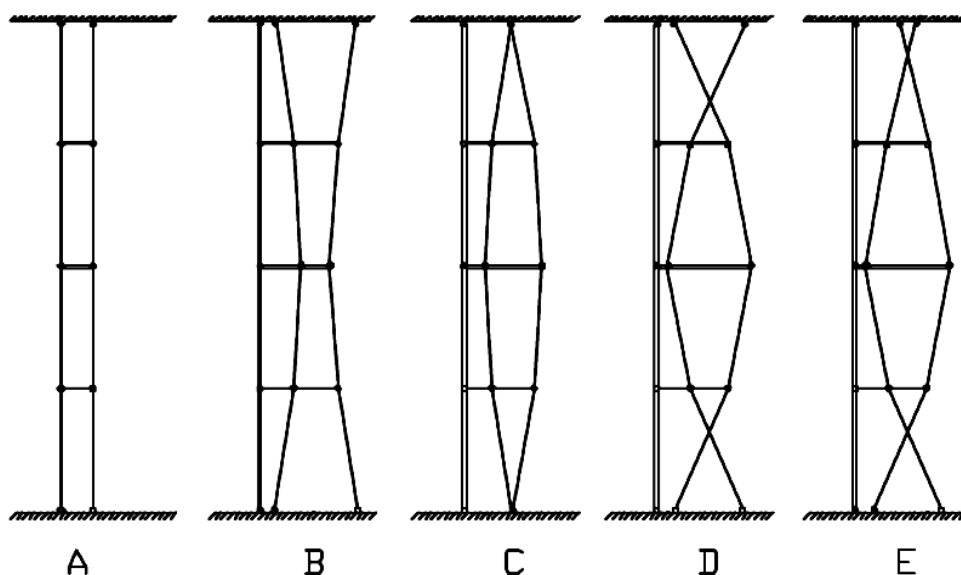


Figura 4.24 - Exemplos de traçados de cabos [12].

Devido à ausência de simetria relativamente ao eixo horizontal, o modelo E não é o mais indicado, pelo que irá deformar sob as acções horizontais assimetricamente (deflexão em S).

Por esse ponto de vista, o modelo com o traçado mais ideal seria o modelo D, já que a rigidez da parte superior é igual à inferior.

O comportamento deste tipo de estrutura de suporte é condicionado pela variação de temperatura, pois a distensão do sistema de cabos torna o sistema instável. Para evitar esta situação, os cabos são tensionados através de esticadores nas suas extremidades (Figura 4.25) [12].



Figura 4.25 - Esticador de aço AISI 316 [5].

Os cabos encontram-se ligados às aranhas através de espaçadores e para qualquer carregamento tem de permanecer em tensão, caso contrário é como se fossem inexistentes [12].

As estruturas podem também ser compostas por cabos e perfis de aço (Figura 4.26) [28].

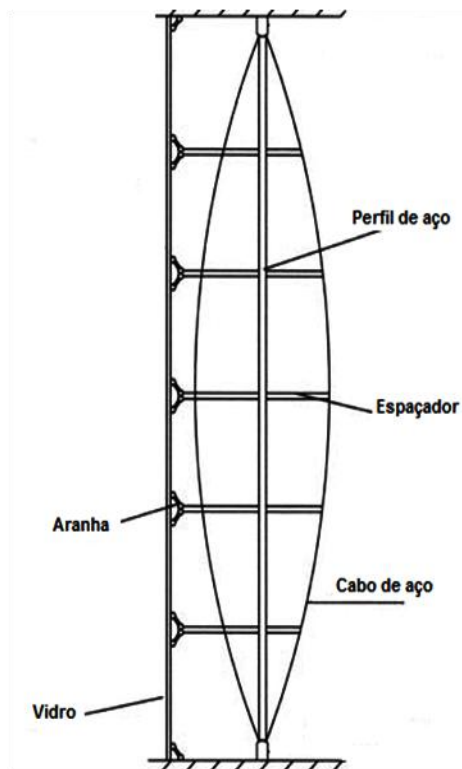


Figura 4.26 - Estrutura de suporte composta por cabos parabólicos e perfil de aço [28].

4.2.2.2 Acções

Os elementos estruturais quando sujeitos a acções, desenvolvem tensões e deformações. Para o estudo do comportamento deste tipo de fachada há que ter em conta as acções a seguir descritas.

4.2.2.2.1 Peso próprio

O peso próprio dos painéis de vidro é suportado apenas pelos parafusos superiores (Figura 4.27), para esse efeito, os painéis têm de ficar pendurados. Para que os parafusos inferiores não suportem parte desse peso, os seus furos tem de ser folgados, de modo a permitir a compensação das tolerâncias dimensionais devidos à acção do vento e dos movimentos diferenciais [36].



Figura 4.27 - Efeito do peso próprio [36].

4.2.2.2.2 Acções climáticas

A acção climática mais problemática é o vento, pois quando atinge a fachada, esta é exposta a fenómenos de sobrepressão e sucção (Figura 4.28).

Os painéis devem possuir uma grande resistência à flexão, porque quando expostos a estes fenómenos vão flectir, surgindo grandes esforços.

Os parafusos são sujeitos a grandes tracções, logo tem de estar aptos para resistir quando tentam ser arrancados dos painéis [36].

A pressão característica do vento é determinada de acordo com a norma EN1991 – 4, e depende do tipo de terreno, da localização, altura e geometria da estrutura e das aberturas existentes (Anexo B).



Figura 4.28 - Deformação do painel devido a acção do vento [36].

4.2.2.2.3 Movimentos Diferenciais

Os painéis de vidro e elementos de aço quando sujeitos a variações de temperatura, sofrem fenómenos de dilatação e contracção, mas como o coeficiente de expansão térmica para ambos os materiais é diferente, nunca acontece com as mesmas proporções.

Estes fenómenos induzem movimentos diferenciais entre os painéis de vidro e os seus suportes. As rótulas permitem esses movimentos, reduzindo assim os esforços transmitidos aos painéis, evitando dessa forma o risco de quebra do vidro (Figura 4.29) [36].

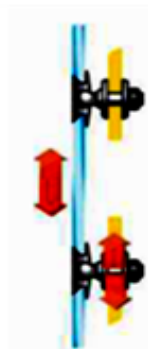


Figura 4.29 - Deformação devida à variação de temperatura [36].

4.2.2.2.3 Combinação de acções

Para o dimensionamento destas fachadas devem ser verificada a combinação mais desfavoráveis relativamente aos estados limites últimos e de utilização, para que a estrutura seja projectada com segurança como já foi mencionado no capítulo 3.

5. Estudo da fachada real

5.1 Objectivos

Neste capítulo vai ser aplicado o conceito de “engenharia inversa”, isto é, através de uma fachada existente será feito um estudo do seu comportamento estrutural, em termos de esforços e deformabilidade, quando sujeita a acção do vento.

5.2 Descrição

O Teatro de Camões localizado no Parque das Nações, em Lisboa (Figura 5.1) com desenvolvimento em planta aproximadamente rectangular ocupando uma área cerca de 92 m x 39,02 m possui uma fachada envidraçada com o sistema de fixação “vidro exterior agrafado”, a qual é o caso de estudo desta dissertação (Figura 5.2).



Figura 5.1 - Teatro de Camões [63].

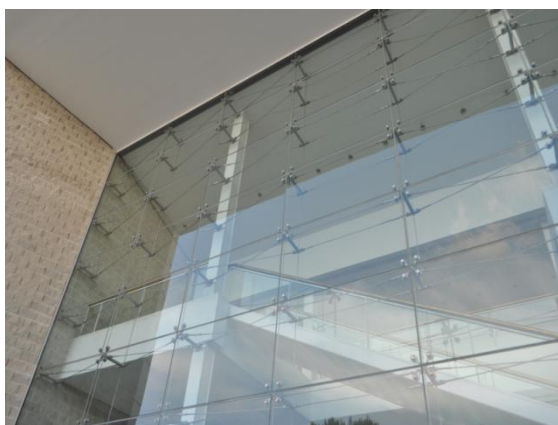


Figura 5.2 - Fachada envidraçada do Teatro de Camões.

Para a análise do seu comportamento, foi feito um levantamento das suas dimensões (Figura 5.3), dos tipos de secções e materiais dos elementos que a constituem.

Ao longo deste capítulo são apresentadas algumas imagens recolhidas durante a visita.

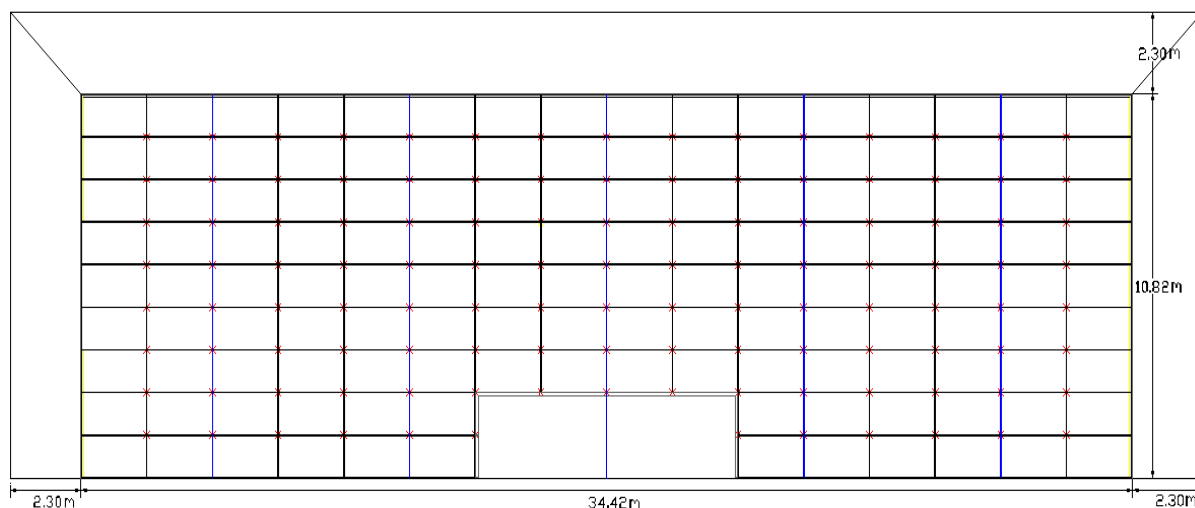


Figura 5.3 – Dimensões da fachada em análise.

5.3 Materiais e constituintes

A fachada é constituída por 16 alinhamentos verticais e 9 horizontais de painéis de vidro espaçados entre si com 2,0 cm de mástique, suportados por 5 perfis metálicos HEB alternados com cabos verticais, e contraventada por uma rede de cabos horizontais distribuída ao longo do seu comprimento.

Nos subcapítulos seguintes são apresentadas informações mais específicas de cada um destes elementos.

5.3.1 Painéis de vidro

Cada painel que constituí esta fachada tem as dimensões apresentadas na Figura 5.4 e uma espessura de 8,0 mm. O tipo de vidro utilizado é vidro de segurança temperado “SGG securit” com as propriedades descritas no Quadro 5.1.

Peso específico (kN/m³)	25,525
Módulo de elasticidade (GPa)	70
Coeficiente de Poisson	0,2
Coeficiente de expansão térmica (1/K)	9×10^{-6}

Quadro 5.1 - Propriedades dos painéis de vidro “SGG Securit” [41].

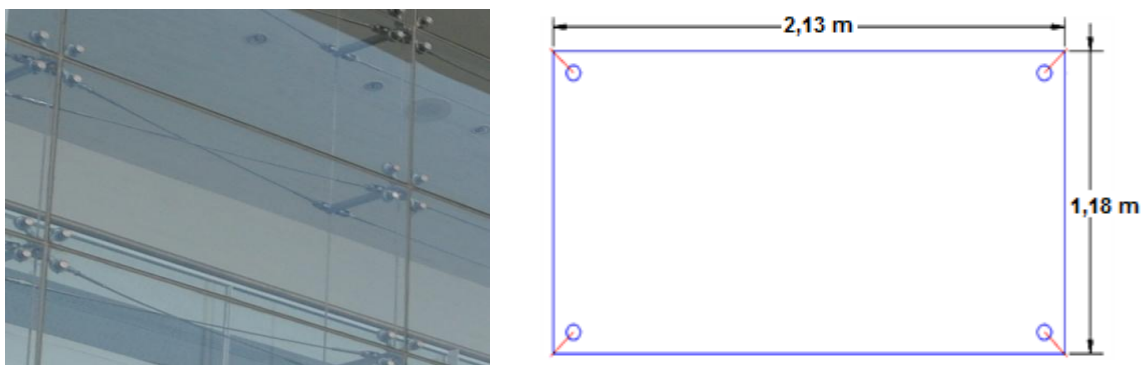


Figura 5.4 - Dimensões dos painéis da fachada em estudo.

5.3.2 Aço

Para todos os elementos metálicos que fazem parte do sistema de fixação adoptou-se um aço estrutural de elevada resistência, o aço S355 que apresenta as seguintes características:

Peso próprio (kN/m^3)	78,5
Módulo de elasticidade (GPa)	210
Coeficiente de Poisson	0,3
Tensão de cedência (MPa)	355

Quadro 5.2 - Características do aço S355.

5.3.3 Aranhas e rótulas

A fachada é composta por 31 aranhas com dois braços que ligam os painéis junto aos bordos (Figura 5.5) e 117 aranhas com quatro braços que unem os restantes (Figura 5.6). Todas elas são rotuladas de modo a permitir a livre flexão dos vidros quando sujeitas a acção do vento.



Figura 5.6 – Aranha com dois braços.



Figura 5.5 - Aranha com quatro braços.

5.3.4 Cabos

A fachada é composta por nove alinhamentos de cabos horizontais com o traçado representado nas figuras seguintes:



Figura 5.7 - Traçado de cabos horizontais.



Figura 5.8 – Vista inferior dos cabos horizontais.

Estes cabos tensionados são do tipo ACMO com 25 mm de diâmetro e apresentam as características descritas no Quadro 5.3.

Tensão de rotura (kN/mm^2)	46100
Peso (kg/m)	3,188
Secção (mm^2)	376,61

Quadro 5.3 - Características do cabo ACMO M25 [24].

Devido à escassez de informação das propriedades intrínsecas dos cabos, adoptou-se o sistema de cabos do tipo Macalloy SC460 Stainless Cable, com a mesma tensão de rotura que equivale a um cabo com 19 cordões e um módulo de elasticidade de 107 GPa [33].

A função destes cabos é contraventar a fachada, de modo que a estrutura não sofra fenómenos de instabilidade quando sujeita à acção do vento. Para esse efeito, nas suas extremidades possuem esticadores, de forma a garantir que para qualquer solicitação se encontram tensionados (Figura 5.9).

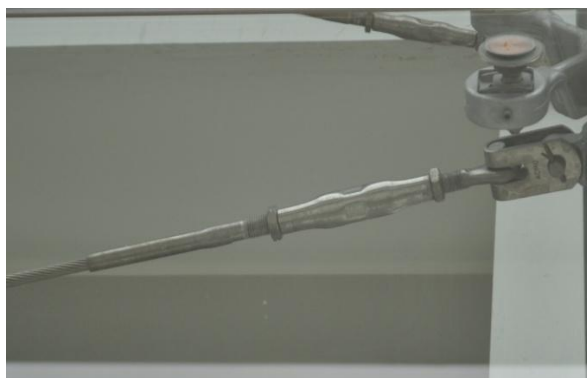


Figura 5.9 – Esticadores dos cabos horizontais.

Relativamente aos cabos verticais, uns situam-se junto aos painéis de vidro com espaçamentos entre si de 2,15 m e os outros, em grupos de dois espaçados também de 2,15 m encontram-se no alinhamento dos perfis metálicos alternados com estes (Figura 5.10).



Figura 5.10 - Cabos verticais.

Tal como os horizontais, os cabos verticais têm de estar tensionados e são fixos como demonstra a Figura 5.11.



Figura 5.11 – Fixação dos cabos verticais

5.3.5 Perfis metálicos

Os perfis de aço que compõem a estrutura de suporte desta fachada são do tipo HEB 300, e encontram-se afastados entre si de 6,45 m.

Em relação à base dos perfis, a ligação é feita com uma chapa de base e quatro chumbadores como está ilustrado na Figura 6.12.

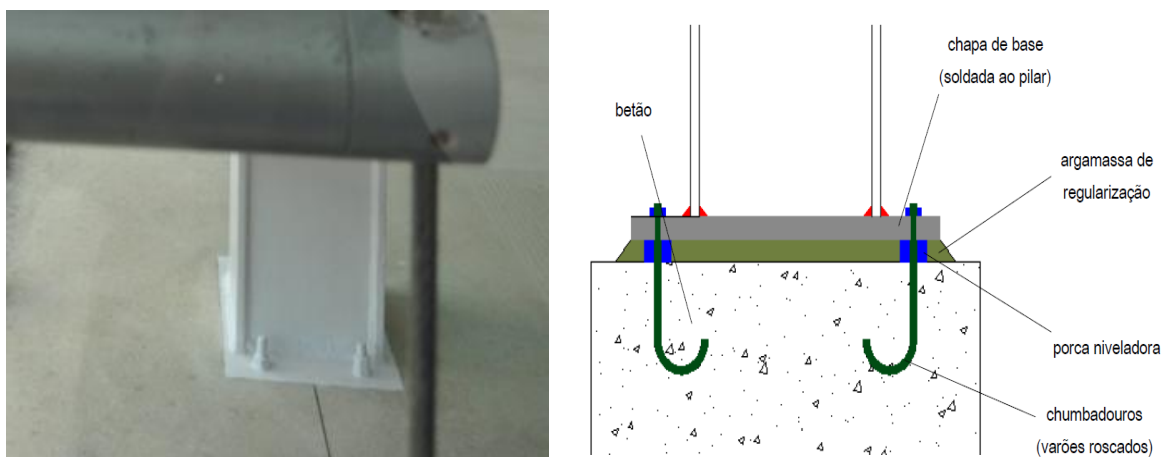


Figura 5.12 - Ligação base do perfil HEB 300 [19].

6.3.6 Espaçadores metálicos

Os perfis e os cabos de aço estão ligados as aranhas através de espaçadores com comprimento de 0,66 m e 0.49 m, respectivamente. Estes têm um diâmetro exterior de 80 mm com 4 mm de espessura (Figura 5.13).



Figura 5.13 - Espaçadores.

5.4 Modelação da fachada

Para estudo do comportamento estrutural da fachada em termos de esforços e deformabilidade, quando sujeita à acção do vento, foi desenvolvido um modelo de elementos finitos com o auxílio do programa de cálculo automático SAP2000 v14.

A modelação deve ser feita com o maior cuidado, de forma aproximar o modelo computacional o mais possível da realidade.

Para simular o comportamento da fachada, os elementos estruturais foram modelados respeitando a sua secção e condições de apoio, da seguinte forma:

- Os painéis de vidro foram modelados com elementos finitos de área (shell) com quatro nós;
- Os cabos horizontais e verticais e os espaçadores metálicos foram modelados com elementos finitos de barra (frame);
- Os perfis HEB 300 foram simulados como elementos finitos de barra (frame), e as suas extremidades foram consideradas apoiadas para evitar o aparecimento de momentos flectores nestes pontos;
- Aranhas foram modeladas como elementos finitos de barra, e nas extremidades em contacto com os painéis de vidro possuem rótulas, de forma a evitar a transferência de esforços de flexão.

Após a modelação destes elementos obteve-se modelo tridimensional apresentado nas Figuras 5.14 e 5.15.

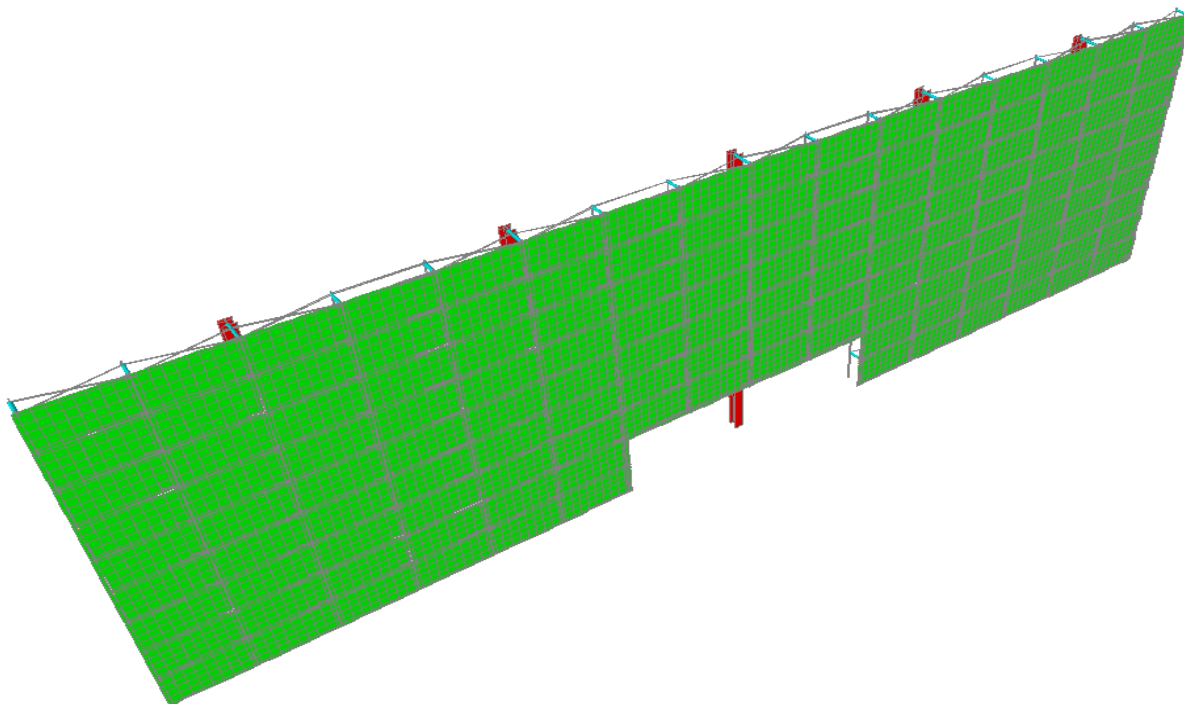


Figura 5.14 - Modelo tridimensional da fachada com os painéis de vidro.

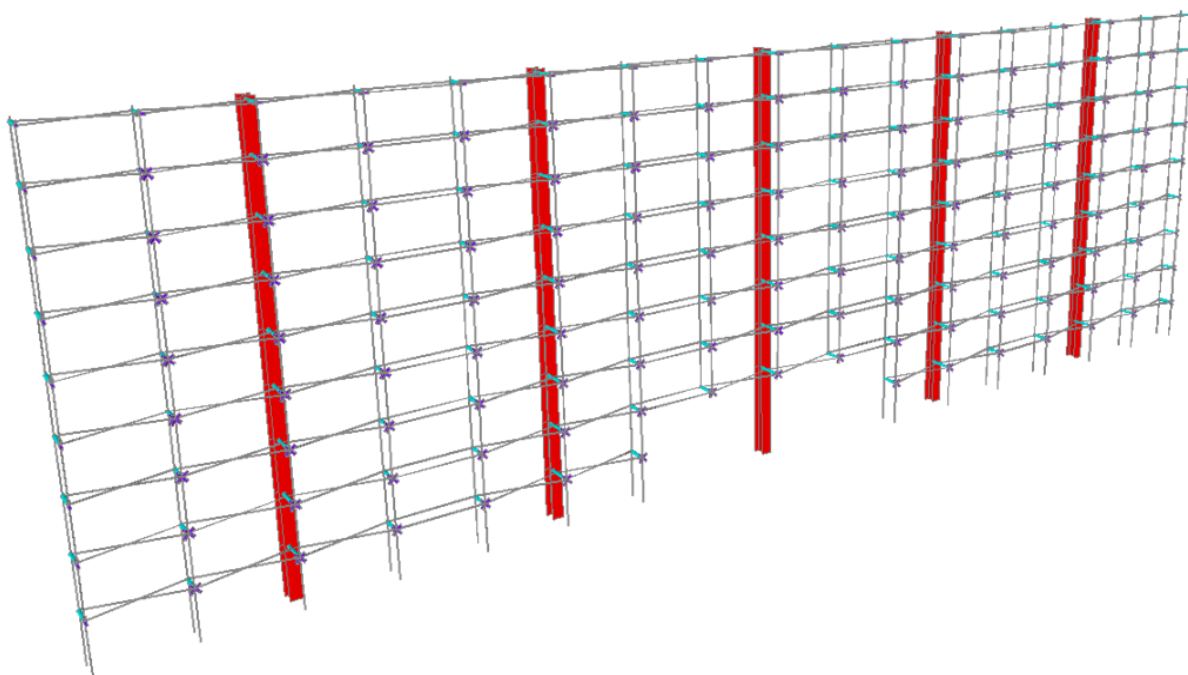


Figura 5.15 - Modelo tridimensional da fachada sem os painéis de vidro.

O estudo do comportamento da estrutura de suporte será feito a partir de uma análise bidimensional, em que o valor da acção do vento é determinado em função da área de influência (corresponde a metade da largura dos painéis de cada lado). O modelo bidimensional da fachada existente está apresentado na Figura 5.16.



Figura 5.16 - Modelo bidimensional da fachada existente.

5.4.1 Acções

Relativamente às acções, o peso próprio é calculado automaticamente pelo programa de cálculo, tendo em conta os pesos específicos e as geometrias das secções dos elementos constituintes e a pressão característica do vento foi simulada como uma carga distribuída aplicada sobre a área dos painéis de vidro com os valores apresentados no Quadro 5.4, determinados de acordo com a norma EN 1991- 4 (Anexo B).

Fachada E	Fachada A e B			Fachada D
	Zona A	Zona B	Zona C	
w _{e,10} (kPa)				
1,21	-1,28	-0,85	-0,53	-0,43

Quadro 5.4 - Pressões características do vento que actuam sobre a fachada de vidro (fachada E).

5.4.3 Combinação de acções

As combinações importantes para o estudo do comportamento da fachada são a combinação fundamental para análise dos esforços e a combinação frequente para análise da deformabilidade, quando a fachada esta sujeita à acção do vento.

Estas foram introduzidas manualmente no programa SAP2000, com os respectivos coeficientes parciais (Quadros 3.1 e 3.2) referidos no capítulo 3, o qual determinará automaticamente os esforços da fachada.

5.5 Análise de esforços

Após a introdução do modelo da fachada no programa SAP2000, obteve-se os esforços resultantes das combinações de acções.

5.5.1 Estrutura metálica

A nível da estrutura de suporte, o esforço axial devido às solicitações é absorvido tanto pelos espaçadores, como por os perfis de aço HEB 300, estando os seus valores máximos para a combinação fundamental apresentados no Quadro 5.5.

Efeito do vento sob a estrutura	Esforço axial máximo (kN)	
	Espaçadores	Perfil HEB 300
Sucção	7,14	0,95
Pressão	-6,91	-0,95

Quadro 5.5 - Valores de esforço axial máximo nos espaçadores e no perfil HEB300 para a combinação fundamental - Modelo real.

Quanto aos momentos flectores, como o perfil HEB 300 está sujeito aos esforços horizontais devido à acção do vento, para os estados limites últimos é o elemento que absorve os maiores esforços de flexão.

No Quadro 5.6 são indicados os respectivos valores máximos.

Efeito do vento sob a estrutura	Momento flector máximo M33 (kN.m)
Sucção	59,08
Pressão	-57,24

Quadro 5.6 - Valores do momento flector máximo no perfil HEB300 para a combinação fundamental – Modelo real.

Em termos de esforços, a situação mais condicionante para o modelo real, verifica-se para o vento à sucção, e com os digramas apresentados na Figura 5.17 (a) e Figura 5.17 (b), para o esforço axial e momento flector, respectivamente.

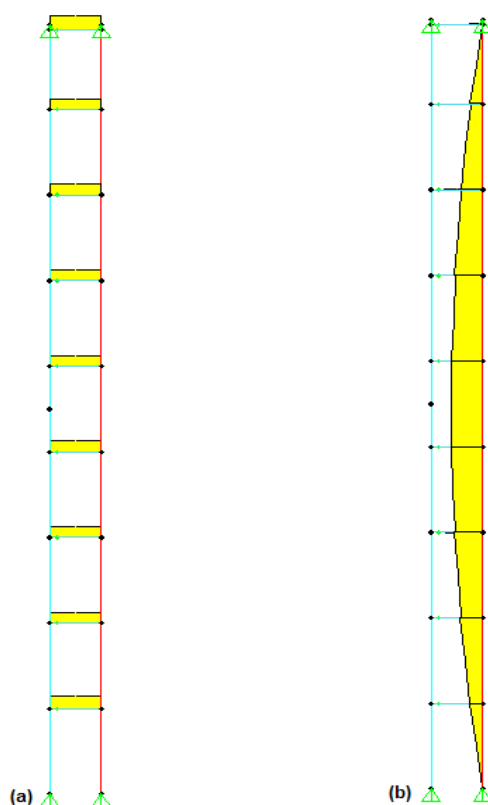


Figura 5.17 - (a) - Diagrama de esforço axial e (b) – Diagrama de momento flector para a combinação fundamental (sucção) - Modelo real.

A análise do esforço axial ao longo da rede de cabos horizontais será feita através do modelo tridimensional da fachada. Observa-se pelo diagrama de esforço axial apresentado na Figura 5.18 que, quando o vento actua na direcção da fachada alguns cabos horizontais são comprimidos e os que estão traccionados quando o vento actua nas outras fachadas (sucção) também são comprimidos.

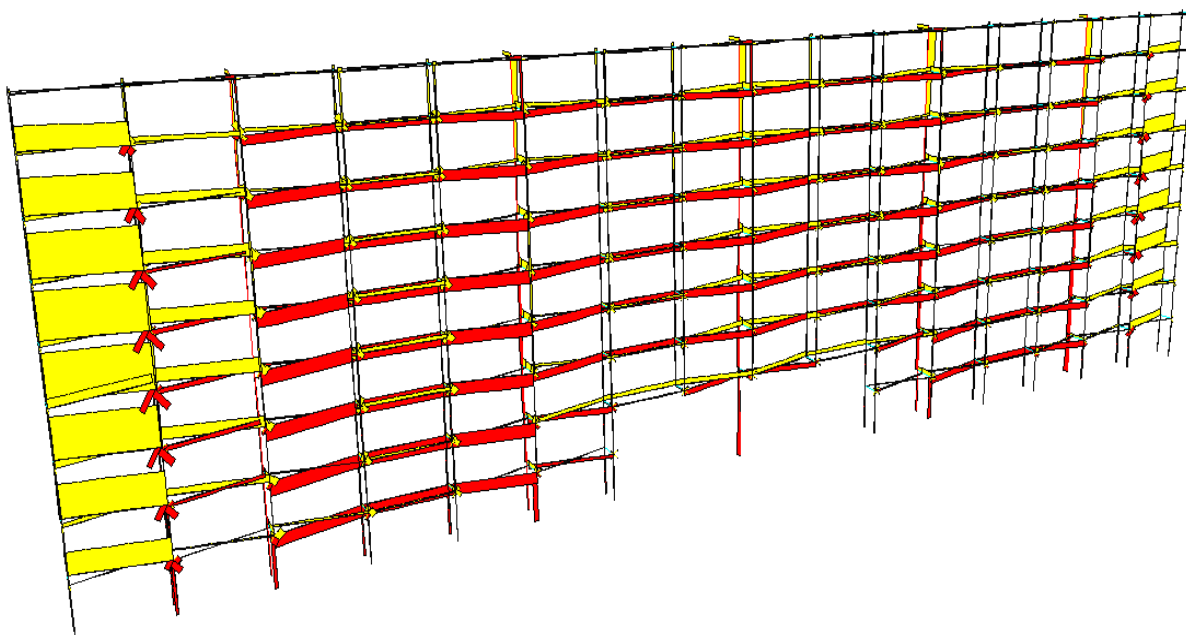


Figura 5.18 - Esforço axial devido à acção do vento, que actuar perpendicularmente à fachada de vidro (mais condicionante).

Tal não pode acontecer, uma vez que os cabos não resistem à compressão. Para contornar esse problema, tem de ser aplicadas forças de pré-tensão de forma que estes fiquem todos traccionados com o vento actuar em qualquer direcção.

A aplicação do pré-esforço nos cabos no programa de cálculo foi feita através de uma variação de temperatura.

Ao aplicar uma variação de temperatura em cada cabo de um alinhamento, irá obter-se uma matriz de influência $[M]$, devido ao facto dos cabos de cada alinhamento serem dependentes uns dos outros, isto é, ao comprimir um, os restantes são traccionados e vice-versa.

Posteriormente, a inversa dessa matriz deverá ser multiplicada por um vector de esforços axiais para a combinação mais condicionante, necessários para anular as compressões dos cabos. Daí resulta o vector das forças de pré-tensionamento aplicar em cada cabo.

Estas relações podem ser descritas através das seguintes equações:

$$[M_{i,j}] \times \{C_i\} = \{F_i\} \quad (5.1)$$

com:

$[M_{i,j}]$ – Matriz de influência, constituída pelos esforços nos cabos “j”, devido à variação de temperatura arbitrária (para o caso de estudo considerou-se -100°C) aplicada no cabo “i”, em que “i” e “j” $\leq n$;

$$[M_{i,j}] = \begin{bmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} & m_{1,3} & \dots \\ m_{2,1} & m_{2,2} & \dots & \dots \\ m_{3,1} & \dots & m_{3,3} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & m_{n,n} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

n – Número total de cabos de cada alinhamento;

$\{F_i\}$ – Vector do esforço axial necessário para anular as compressões mais condicionantes para cada cabo “i”;

$$\{F_i\} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \dots \\ F_n \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

$\{C_i\}$ – Vector das forças de pré-tensão aplicar em cada cabo “i”.

$$\{C_i\} = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \dots \\ C_n \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

No Anexo F, são apresentadas os valores das matrizes e dos vectores para o caso em estudo.

Na Figura 5.19 está apresentado o digrama do esforço axial dos cabos pré-tensionados, onde se verifica a ausência de compressões.

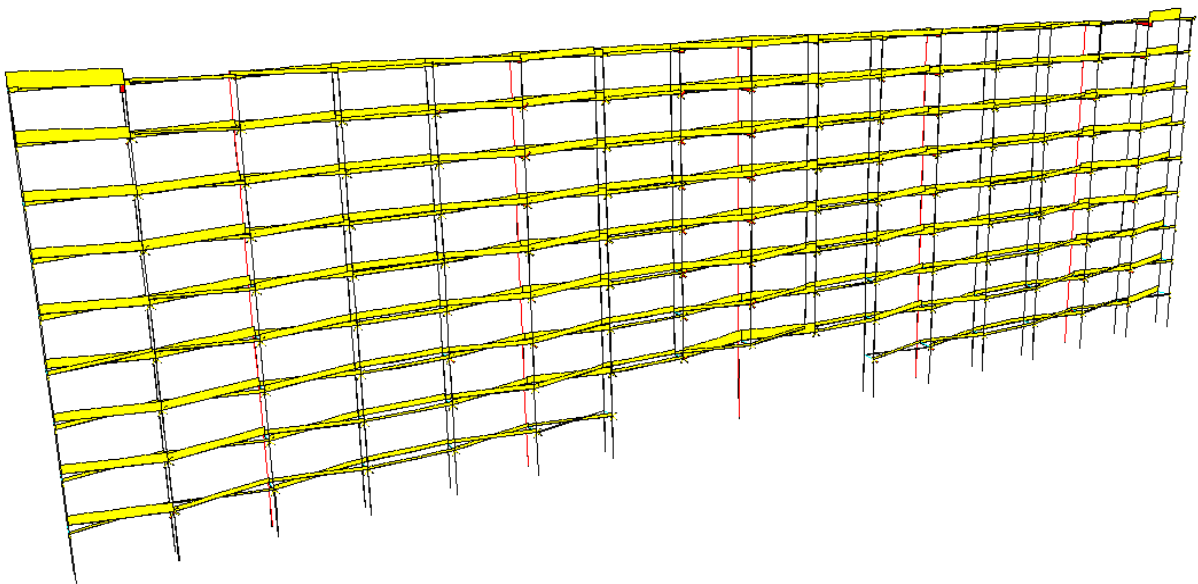


Figura 5.19 - Esforço axial nos cabos horizontais pré-tensionados.

5.5.2 Painéis de vidro

Para analisar a distribuição de tensões nos painéis de vidro, recorreu-se ao critério de Von Mises, que permite obter uma tensão média da tensão normal e tangencial em todos os pontos da secção.

Esta tensão equivalente de Von Mises é determinada através das tensões principais (σ_1 , σ_2 e σ_3) da seguinte forma:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}{2}} \quad (5.5)$$

Através do modelo tridimensional (Figura 5.20), verifica-se que os maiores valores de tensão são a nível dos furos dos painéis, como já era de se esperar.

Para analisar melhor o comportamento do vidro em termos de tensões, foi isolado um painel de vidro num modelo à parte, considerando o coeficiente de pressão local para o cálculo da pressão do vento (Anexo B). Os valores máximos e mínimos estão apresentados no Quadro 5.7

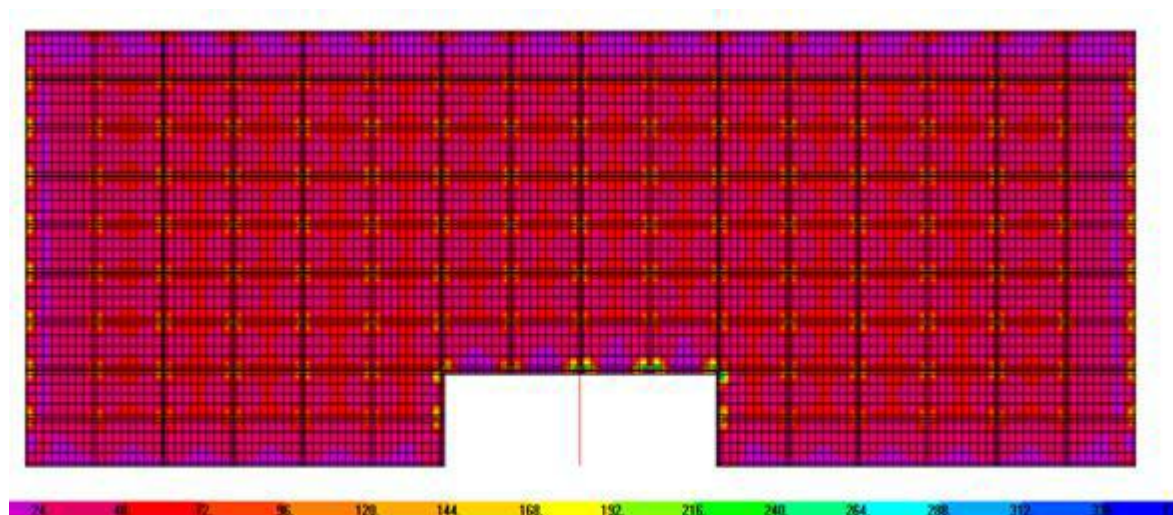


Figura 5.20 - Diagrama de distribuição de tensões de Von Mises para o vento actuar perpendicularmente à fachada (mais condicionante).

Efeito do vento	SMV (MPa)	
	Máxima	Mínima
Pressão	108,70	15,97
Sucção	98,18	14,42

Quadro 5.7 - Valores máximos e mínimos da tensão de Von Mises na face superior do painel para o modelo do painel isolado.

A Figura 5.21 mostra a distribuição de tensões de Von Mises na área do painel para a combinação mais gravosa (sobrepessão).

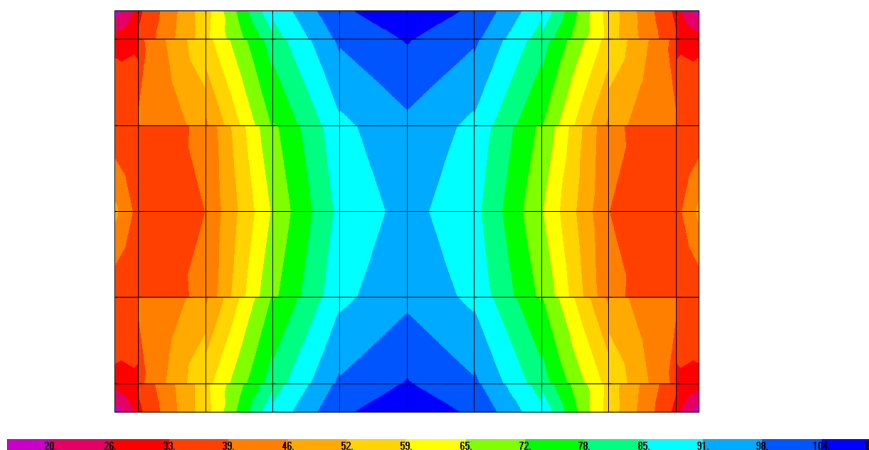


Figura 5.21 - Diagrama de distribuição de tensões de Von Mises ao longo do painel (sobrepessão).

5.6 Análise de deslocamentos

Como a solicitação em causa é a acção do vento, a combinação a considerar é a frequente (Equação 3.5), cuja corresponde às acções que se repetem muitas vezes durante a vida útil da estrutura.

Esta combinação é, geralmente utilizada para a verificação das deformações excessivas, que neste caso, é o que se pretende verificar.

Pela Figura 5.22, observa-se os maiores deslocamentos na zona central da fachada com o valor de flecha máxima de 15,1 mm.

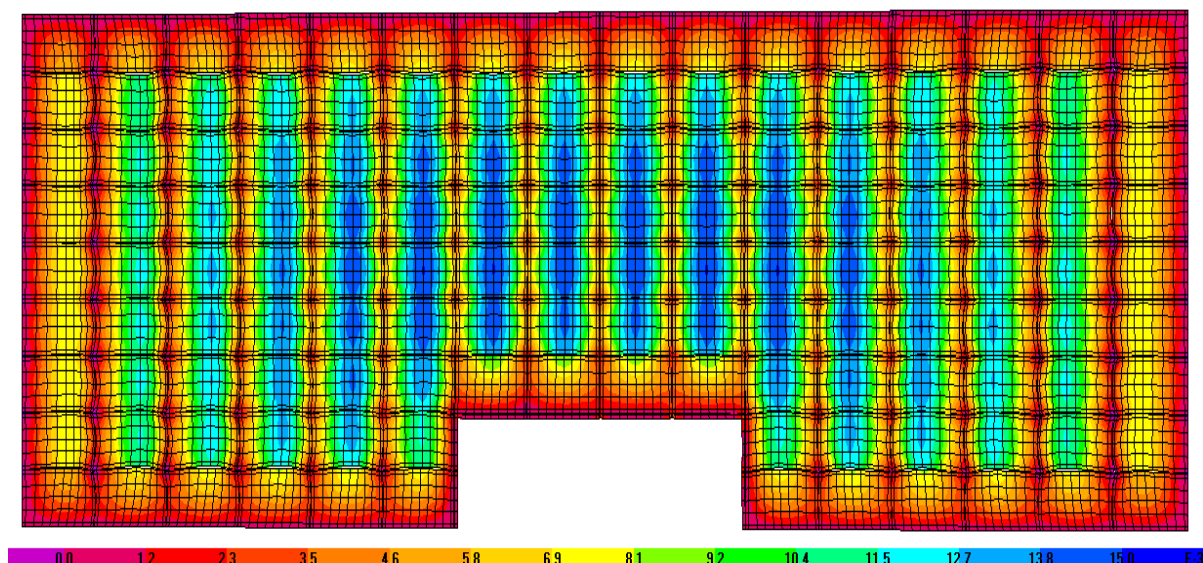


Figura 5.22 – Deslocamentos na fachada real para a combinação frequente.

5.7 Verificações de segurança

5.7.1 Estrutura metálica

A verificação de segurança das secções dos elementos metálicos é feita segundo o Eurocódigo 3 e deve ser realizada para todos os esforços a que a secção está sujeita, até mesmo para interacção entre os esforços. Nestes casos de estudo, para além destas verificações deve ser feita a avaliação do comportamento dos elementos para os possíveis fenómenos de instabilidade local.

Segundo o EC3, a resistência das secções em termos de esforços está assegurada, quando se verifica a seguinte equação:

$$\frac{E_d}{R_d} \leq 1 \quad (5.6)$$

em que:

E_d – Esforço actuante;

R_d – Esforço resistente, determinado consoante a classe de secção do elemento.

A verificação em relação à encurvadura dos elementos é feita através das duas equações seguintes:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (5.7)$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (5.8)$$

em que:

N_{Ed} – Valor de cálculo do esforço axial de compressão;

$N_{b,Rd}$ – Valor de cálculo do esforço axial, considerando a resistência à encurvadura por flexão, torção ou flexão-torção;

M_{Ed} – Valor de cálculo do momento flector actuante;

$M_{b,Rd}$ – Valor de cálculo do momento flector resistente à encurvadura.

A interacção mais condicionante será do momento flector mais esforço axial (flexão composta).

Considerando o eixo y-y paralelo à fachada, para secções duplamente simétricas com banzos com M_y , o efeito do esforço axial pode ser desprezado, caso não se verifique estes critérios:

$$N_{ed} \leq 0,25 \times N_{pl,Rd} \quad (5.9)$$

$$N_{ed} \leq \frac{0,5 \times h_w \times t_w \times f_y}{Y_{M0}} \quad (5.10)$$

em que:

h_w – Altura da alma;

t_f – Espessura dos banzos

t_w – Espessura da alma (se a espessura não for constante, deverá ser considerado igual à espessura mínima);

f_y – Tensão de cedência do aço;

Y_{M0} – Coeficiente parcial de segurança, para o caso da resistência das secções é igual a 1,0.

Caso contrário, verifica-se a segurança à flexão composta da seguinte forma:

$$M_{ed} \leq M_{Ny,Rd} = M_{ply,Rd} \times \frac{(1 - n)}{(1 - 0,5 \times a)} \quad (5.11)$$

com:

n – Relação entre os valores de cálculo dos esforços normais actuante e resistente;
a – Relação entre a área da alma e a área bruta de uma secção transversal.

O SAP2000 permite fazer estas verificações automaticamente, basta definir correctamente as combinações a analisar. Depois de a análise estar completa, os elementos estruturais críticos, isto é, os elementos em que o rácio das relações entre os esforços actuantes e os esforços resistentes é superior ao limite, apresentam uma tonalidade vermelha, o que significa que estes elementos com as secções adoptadas inicialmente não resistem à acção a que estão sujeitos. O valor de limite do rácio imposto pelo programa é de 0,95, ligeiramente inferior ao fornecido pelo Eurocódigo 3.

Para o modelo real, os esforços resistentes obtidos estão apresentados no Quadro 5.8, e como já se era de esperar, todos os elementos verificam a resistência em termos de secções e de encurvadura, pois o rácio varia entre 0 e 0,50 (Figura 5.25)

	N_{Rd} (kN)	V_{Rd} (kN)	M_{Rd} (kN.m)	$N_{b,Rd}$ (kN)	$M_{b,Rd}$ (kN.m)
Perfil HEB300	3698,35	472,91	463,91	3698,35	463,91
Espaçador	178,66	52,58	4,22	178,66	4,22

Quadro 5.8 - Esforços resistentes para os elementos do modelo real.

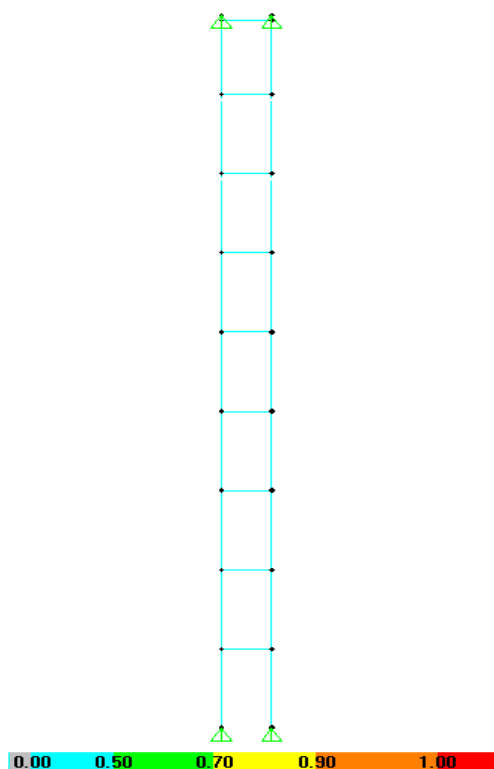


Figura 5.23 – Verificação de segurança do modelo real

Em termos de encurvadura apenas se teria de verificar para os perfis HEB, já que nos perfis tubulares não ocorre instabilidade lateral

Neste caso, não ocorre encurvadura nos perfis, visto que se verificaram os critérios apresentados nas Equações 5.7 e 5.8.

Relativamente aos cabos horizontais, a força máxima determinada pela razão entre a tensão admissível e a sua área, é igual a 80,42 kN, como o valor do esforço axial máximo actuante é de 17,04 kN, a segurança dos cabos está verificada.

5.6.2 Painéis de vidro

Os valores de cálculo das tensões actuantes determinadas pelo programa de cálculo automático, considerando a combinação fundamental para acção do vento mais condicionante, não devem de exceder o valor da tensão admissível determinado através da norma EN 13474-1.

Para o caso dos painéis que constituem esta fachada, a tensão admissível correspondente é igual a 56,4 MPa.

Assim sendo, a tensão de Von Mises obtida pela análise do painel isolado, $SVM = 108,7$ MPa não verifica a segurança.

$$56,4 \leq 106,60 \rightarrow \text{Não verifica}$$

Uma justificação possível para esta condição de segurança não verificar, é a acção do vento determinada de acordo com o EC1 ser superior à de projecto.

Através do cálculo da pressão do vento, observou-se que em vez de ter considerado a categoria de terreno tipo I, de onde se obteve $w_e = 1,52$ kPa, se tivesse considerado a categoria de terreno tipo IV ($w_e = 0,72$ kPa), a segurança estaria verificada.

Contudo, pela informação recolhida do tipo de vidro utilizado, “SGG securit”, através do catálogo da “Saint Gobain Glass”, este apresenta uma tensão admissível de 120 MPa. Considerando este valor, a segurança em termos de resistência está verificada.

Apesar da escassa regulamentação dos limites de deformação dos painéis de vidro temperado apoiados pontualmente, deve ser feito um controlo da deformação, de modo assegurar o bom funcionamento e o aspecto da estrutura.

Considerou-se o deslocamento limite de $L/250$ para a combinação frequente, de forma a controlar as deformações excessivas, garantindo o aspecto visual da fachada quando sujeita ao vento. Assim sendo, para o modelo real está verificada a segurança relativamente aos estados limites de utilização.

$$w_d = \frac{10,78}{250} = 0,043 \text{ m} = 43 \text{ mm} \gg 15,1 \text{ mm}$$

6. Estudo paramétrico com soluções estruturais alternativas

6.1 Apresentação geral dos modelos

Neste capítulo foi feita uma avaliação do comportamento estrutural da fachada em estudo com três soluções estruturais distintas (Figura 6.1).

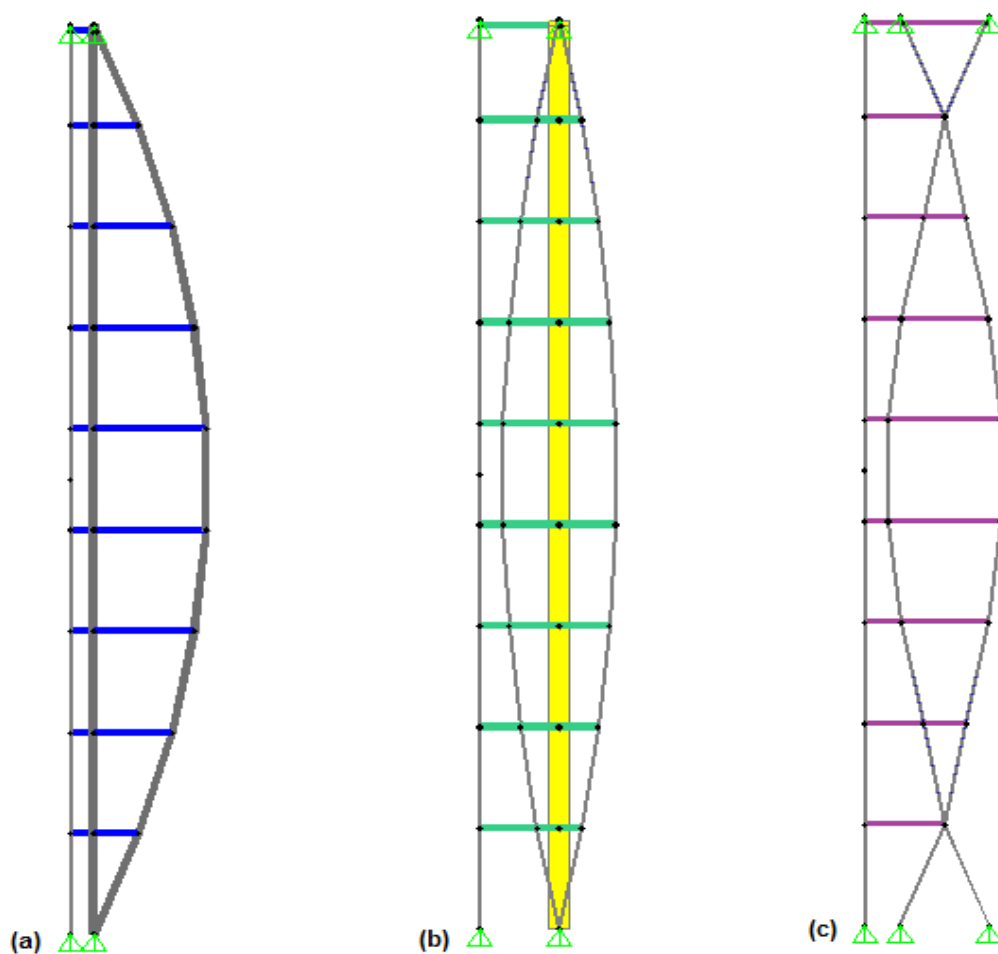


Figura 6.1 – Tipologias estruturais estudadas (a) – Modelo 1, (b) – Modelo 2, (c) – Modelo 3.

Estas tipologias estruturais foram baseadas nos sistemas tensionados desenvolvidos pela “Pilkington”, empresa que actualmente lidera o mercado da tecnologia de estruturas tensionadas em todo o mundo [39].

De seguida, far-se-á uma descrição detalhada de cada um destes modelos.

No modelo 1, os perfis HEB 300 são substituídos por um conjunto de perfis com secções tubulares dispostos em forma de arco.

O modelo 2, para além de ser constituído por perfis de aço HEB, também é composto por um sistema de cabos parabólicos simétricos que se encontram fixos nas extremidades dos perfis.

E por fim, o modelo 3, em que a estrutura é composta apenas por um traçado de cabos parabólicos simétricos que não se intersectam nas extremidades e por espaçadores ao longo do seu comprimento. Para garantir a estabilidade da estrutura, nas extremidades estes cabos são fixos ao limite superior e inferior da estrutura, enquanto no modelo 2 eram fixos aos perfis de aço.

Este é o modelo que permite obter máxima transparência da fachada, pois requer menor quantidade de aço, comparadamente com os anteriores.

Todos os elementos estruturais que constituem cada modelo foram modelados no programa de cálculo automático SAP2000 como “frames” (elementos de barra).

As secções dos elementos para cada solução estrutural alternativa são definidas, de forma que a deformabilidade de cada tipologia estrutural para altura útil de referência de 1,20 m seja idêntica à do modelo real (Figura 6.2).

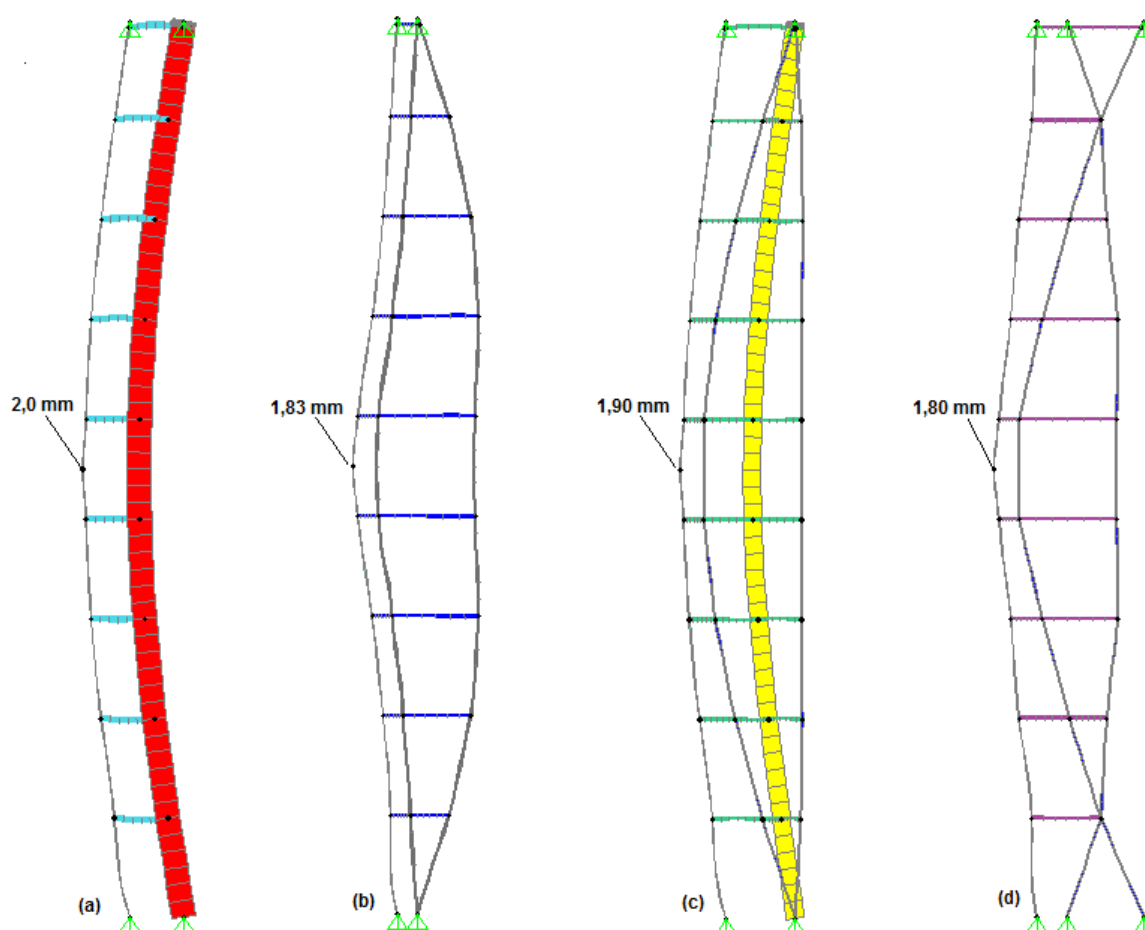


Figura 6.2 – Deformadas do: (a) – modelo real, (b) – Modelo 1, (c) – Modelo 2, (d) – Modelo 3.

As secções adoptadas para cada modelo estrutural estão apresentadas nos quadros seguintes:

	Diâmetro exterior (mm)	Espessura (mm)
Perfis tubulares	42,4	4
Montantes do arco	42,4	2,6

Quadro 6.1 - Secções adoptadas para o modelo 1.

	Diâmetro exterior (mm)	Espessura (mm)
Cabos	20	-
Distanciador metálico	48,3	2,6
Perfil HEB 220	-	-

Quadro 6.2 - Secções adoptadas para o modelo 2.

	Diâmetro exterior (mm)	Espessura (mm)
Cabos	20	-
Distanciador metálico	48,3	3,2

Quadro 6.3 - Secções adoptadas para o modelo 3.

Em termos de esforços, estas estruturas são analisadas no subcapítulo seguinte.

De seguida, são apresentados os modelos tridimensionais para cada tipologia, em que para garantir o contraventamento lateral, os cabos horizontais foram ajustados à altura útil considerada.

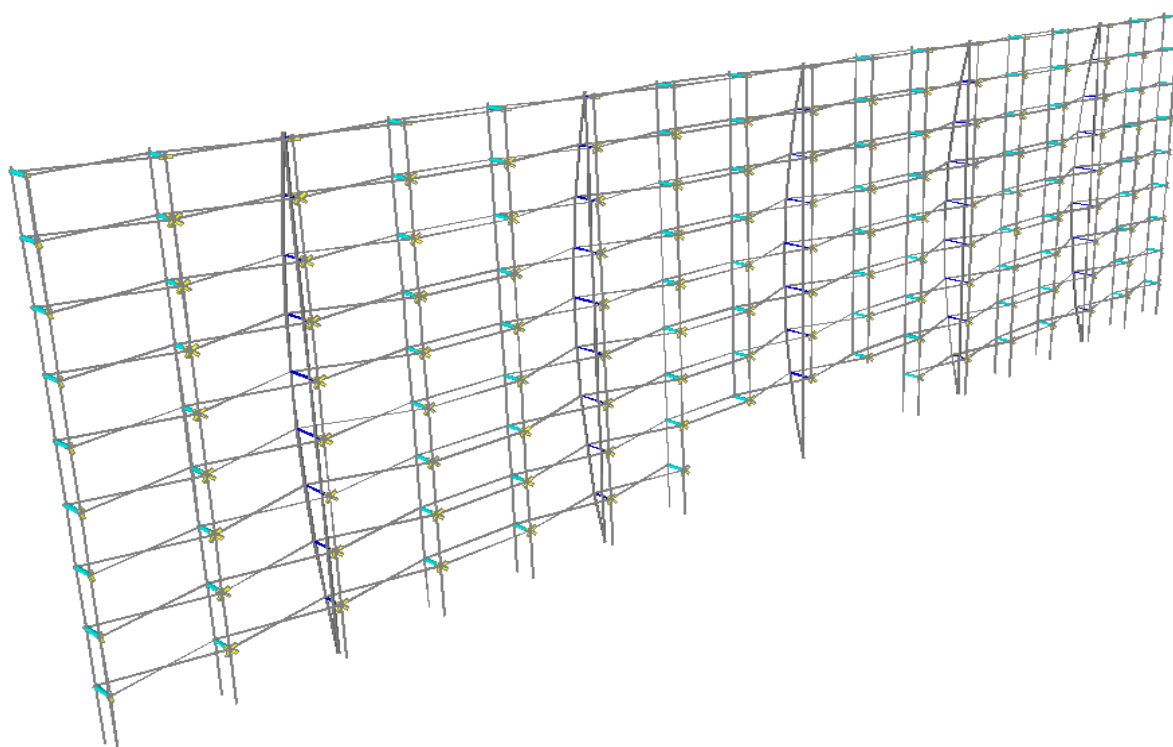


Figura 6.3 - Vista tridimensional do modelo 1

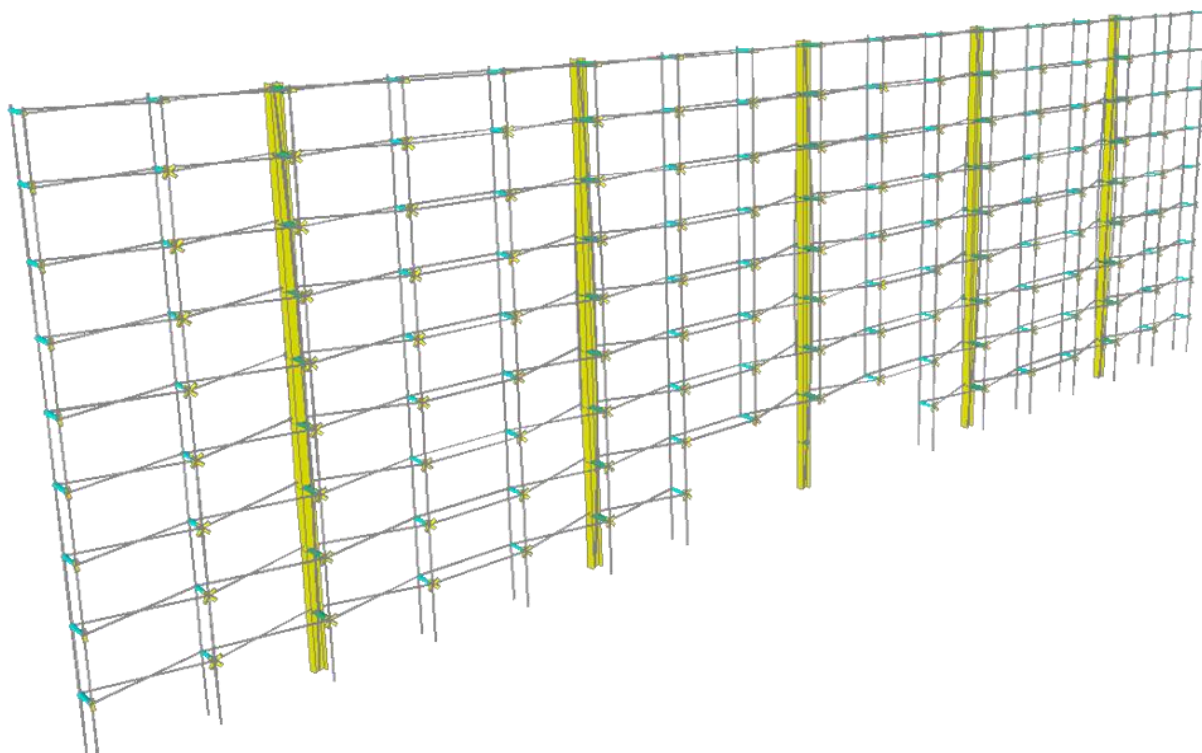


Figura 6.5 – Vista tridimensional do modelo 2.

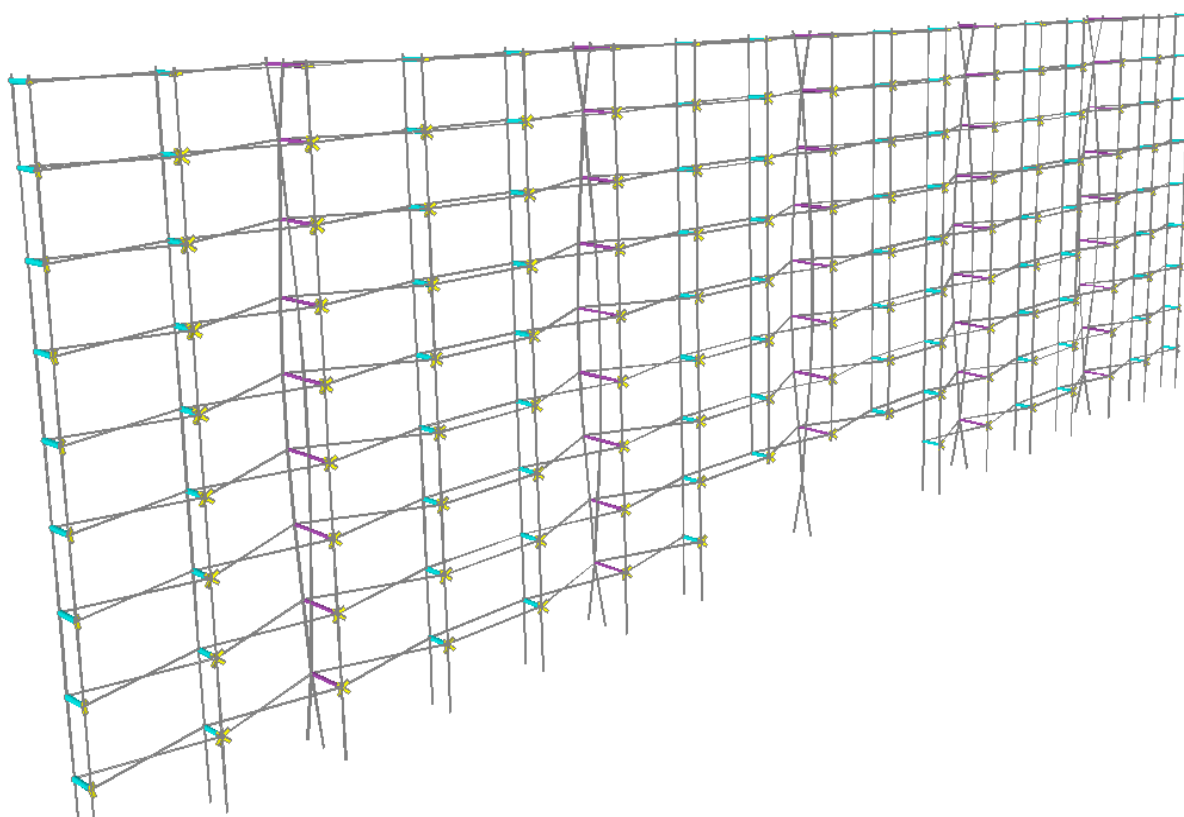


Figura 6.4 - Vista tridimensional do modelo 3.

6.2 Análise de sensibilidade para cada solução alternativa proposta

Neste subcapítulo será feita uma análise de sensibilidade, com o intuito de determinar o efeito da variação da altura útil em cada modelo proposto. Os efeitos analisados são em termos de deslocamentos e esforços da estrutura, através dos quais é possível construir ábacos que permitam determinar, para cada tipologia, a altura útil ideal que se deve considerar de forma a obter um dado deslocamento e a área de aço correspondente.

Para além da altura útil de referência de 1,20 m, já referida anteriormente, cada modelo foi analisado também para as alturas de 0,60 m e 1,80 m.

Após a introdução dos modelos em estudo no programa SAP2000, obteve-se os esforços e os deslocamentos resultantes das combinações de acções. De seguida, são apresentados os seus valores máximos.

6.2.1 Modelo 1

Na Figura 6.6 está apresentada a solução estrutural 1 com os comprimentos dos montantes do arco a meio vão de 0,60 m, 1,20 m e 1,80 m.

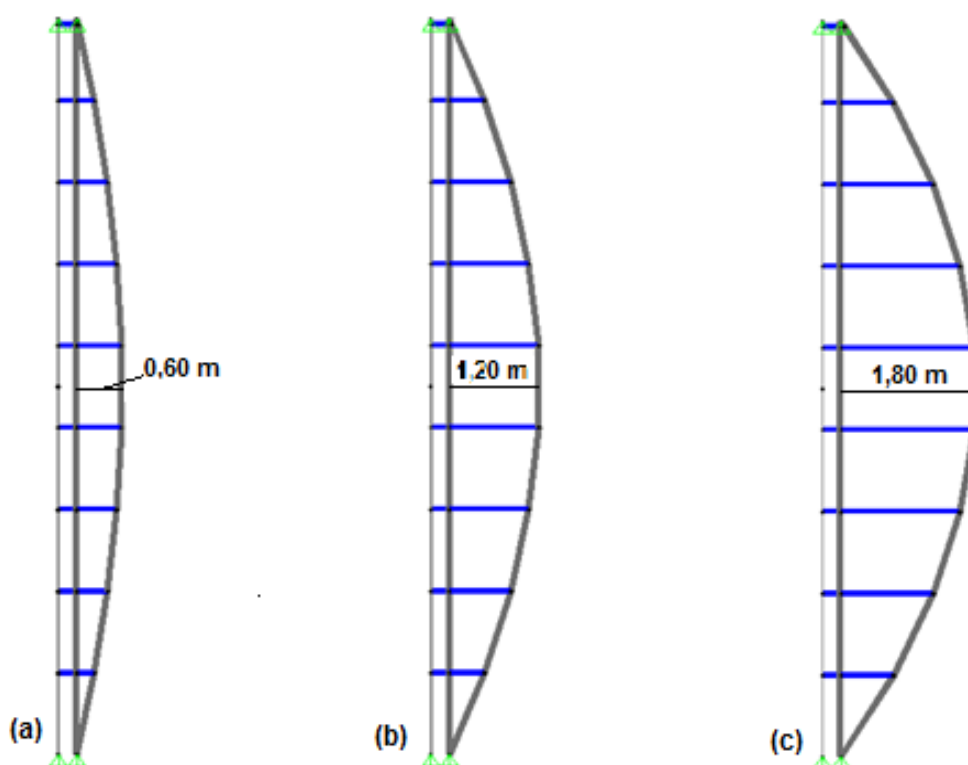


Figura 6.6 - Modelos bidimensionais do modelo 1 com altura útil de: (a) - 0,60 m, (b) - 1,20 m, (c) - 1,80 m.

6.2.1.1 Esforços

O esforço axial de compressão/tracção, consoante a direcção do vento é absorvido pelos montantes do arco, e maioritariamente pelas secções tubulares arqueadas. No Quadro 6.4 são apresentados os seus valores máximos para as diferentes alturas do arco.

Efeito do vento sob a estrutura	Esforço axial máximo (kN)					
	Secções tubulares arqueadas			Montantes do arco		
	0,60 m	1,20 m	1,80 m	0,60 m	1,20 m	1,80 m
Pressão	106,8	57,0	41,1	-7,4	-6,9	-6,8
Sucção	-110,3	-58,8	-42,5	7,7	7,1	7,0

Quadro 6.4 - Valores de esforço axial máximo nas secções tubulares do arco e nos seus montantes do modelo 1 para as alturas úteis de 0,60 m, 1,20 m e 1,80m.

Os diagramas de esforço axial para a situação mais gravosa estão apresentados na Figura 6.7.

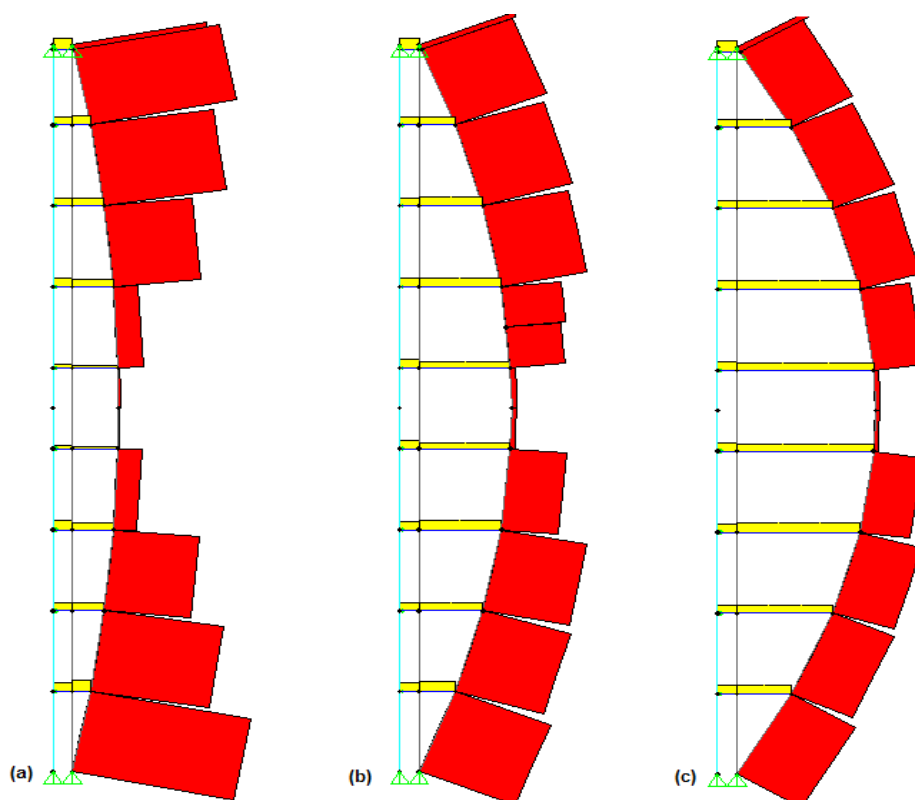


Figura 6.7 – Diagramas de esforço axial do modelo 1 para a altura útil de: (a) - 0,60 m, (b) - 1,20 m, (c) - 1,80 m.

6.2.1.2 Deslocamentos

Em termos de deformabilidade, a flecha máxima para as diferentes alturas do arco, é obtida a meio vão com as configurações e valores apresentados na Figura 6.8 para a combinação frequente mais gravosa (sucção).

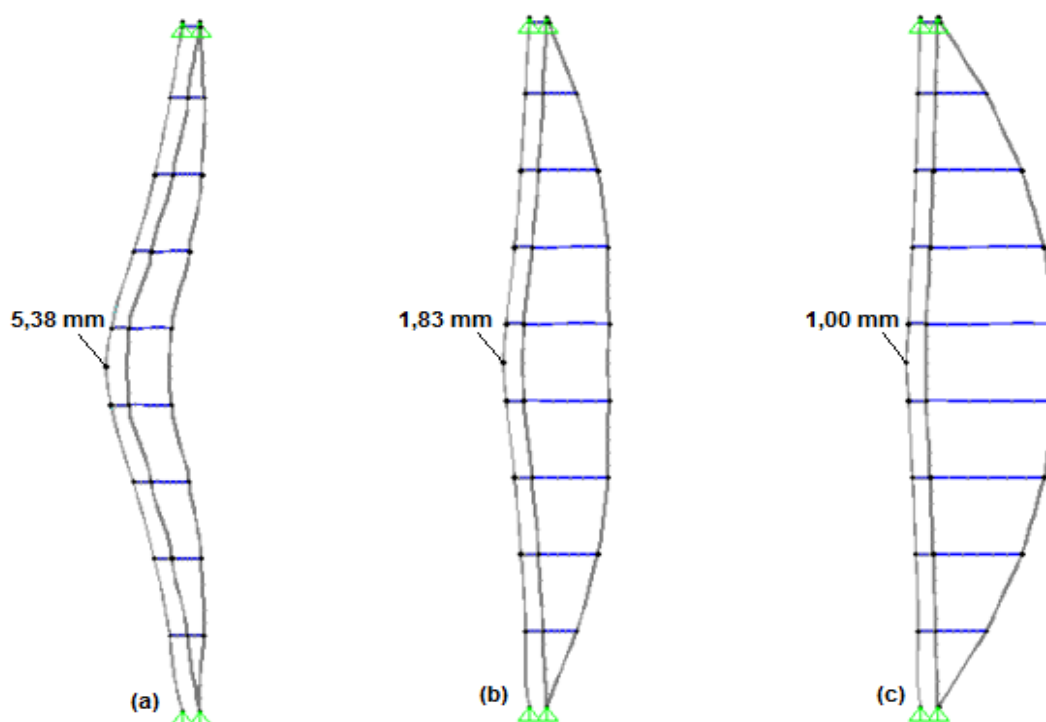


Figura 6.8 – Deformada do modelo 1 para a altura útil de: (a) - 0,60 m, (b) - 1,20 m, (c) - 1,80 m.

6.2.2 Modelo 2

Na Figura 6.9 está apresentada a solução estrutural 2 com a distância entre cabos a meio vão de 0,60 m, 1,20 m e 1,80 m.

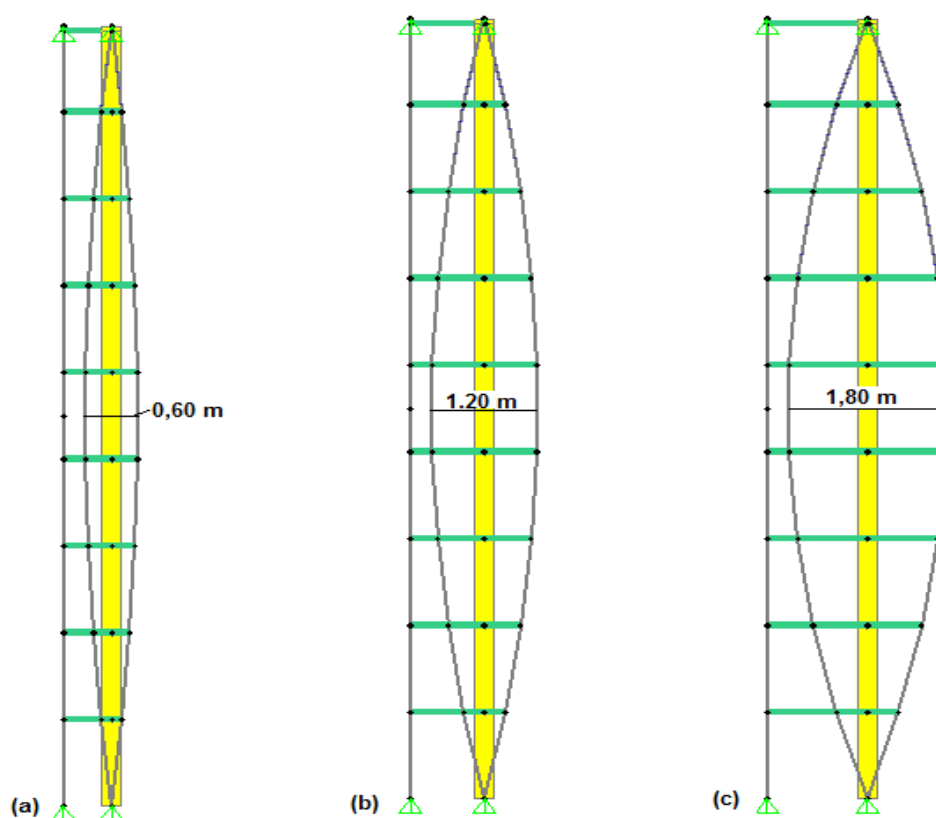


Figura 6.9 - Modelos bidimensionais do modelo 2 com altura útil de: (a) - 0,60 m, (b) - 1,20 m, (c) - 1,80 m.

6.2.2.1 Esforços

Os cabos e os espaçadores de aço são os elementos que absorvem os esforços de compressão/tracção consoante a direcção do vento.

No Quadro 6.5 estão apresentados os seus valores máximos para cada comprimento de braço e na Figura 6.10 os seus diagramas.

Efeito do vento sob a estrutura	Esforço axial máximo (kN)					
	Cabos			Distanciador metálico		
	0,60 m	1,20 m	1,80 m	0,60 m	1,20 m	1,80 m
Pressão	- 44,8	- 44,9	- 35,2	- 6,6	- 6,3	- 6,0
Sucção	46,2	46,4	36,3	6,9	6,5	6,2

Quadro 6.5 - Valores de esforço axial máximo nos cabos e distanciador metálico do modelo 2 para as alturas úteis de 0,60 m, 1,20 m e 1,80m.

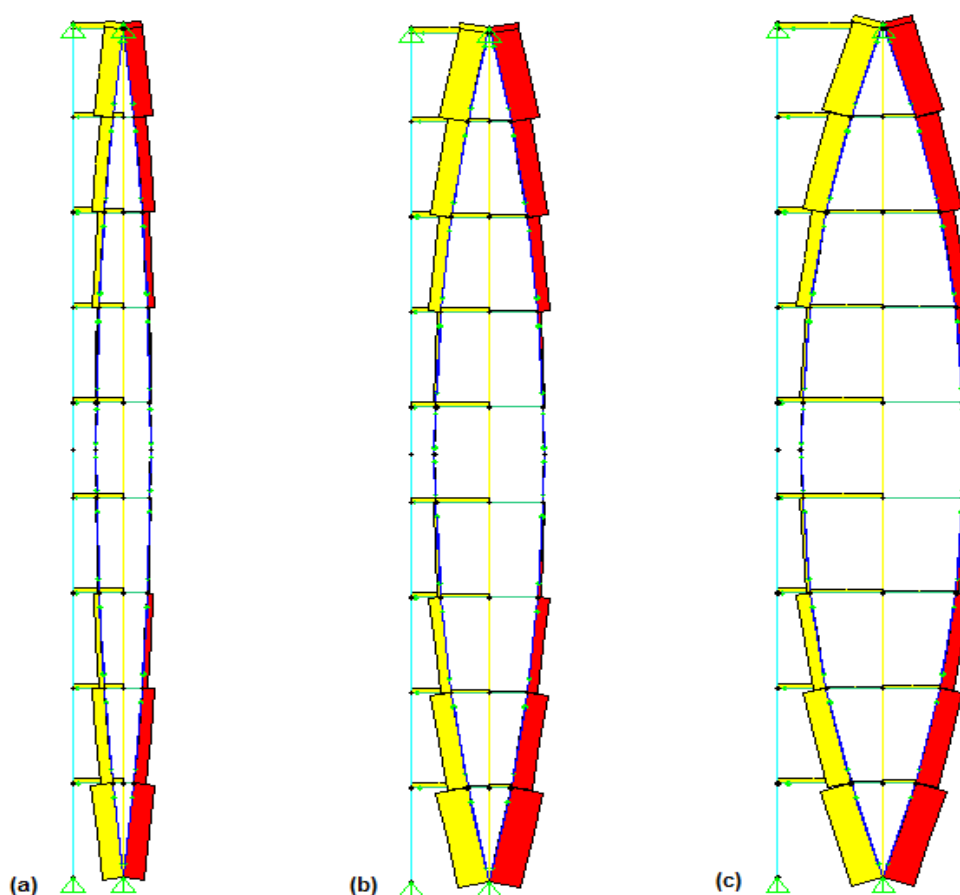


Figura 6.10 – Diagramas de esforço axial do modelo 2 para a altura útil de: (a) - 0,60 m, (b) - 1,20 m, (c) - 1,80 m.

Como os cabos não resistem às compressões, estes devem ser pré-tensionados.

O perfil HEB 220 é o elemento que resiste aos momentos flectores devidos à acção do vento, como se pode ver pelo diagrama apresentado na Figura 6.11, para a combinação fundamental mais condicionante (sucção).

Os valores mais relevantes são apresentados no Quadro 6.6.

Efeito do vento sob a estrutura	Momento flector M33 (kN.m)		
	0,60 m	1,20 m	1,80 m
Pressão	- 33,4	- 21,1	- 14,3
Sucção	34,5	21,8	14,8

Quadro 6.6 - Valores de momento flector máximo nos perfis HEB 200 do modelo 2 para as alturas úteis de 0,60 m, 1,20 m e 1,80m.

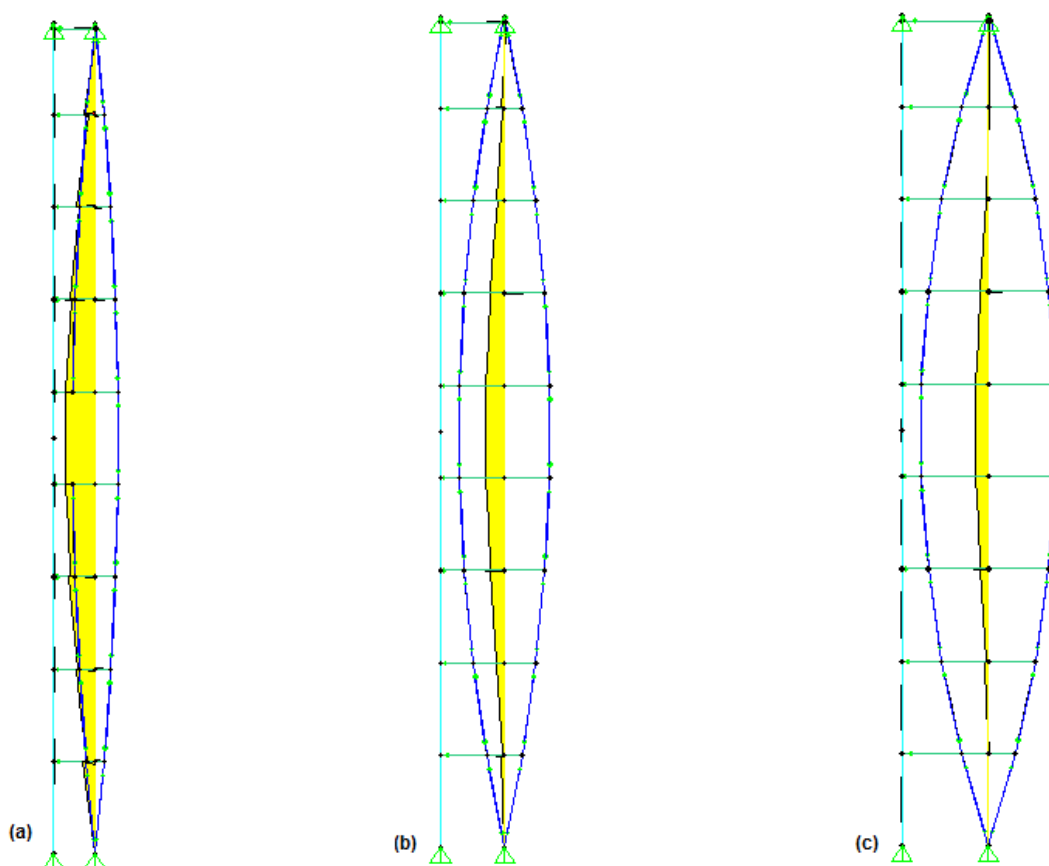


Figura 6.11 - Diagramas de momento flector do modelo 2 para a altura útil de: (a) - 0,60 m, (b) - 1,20 m, (c) - 1,80 m.

6.2.2.2 Deslocamentos

Em termos de deformabilidade, a flecha máxima para as diferentes distâncias entre cabos, é obtida a meio vão com as configurações e valores apresentados na Figura 6.12 para a combinação frequente mais gravosa (sucção).

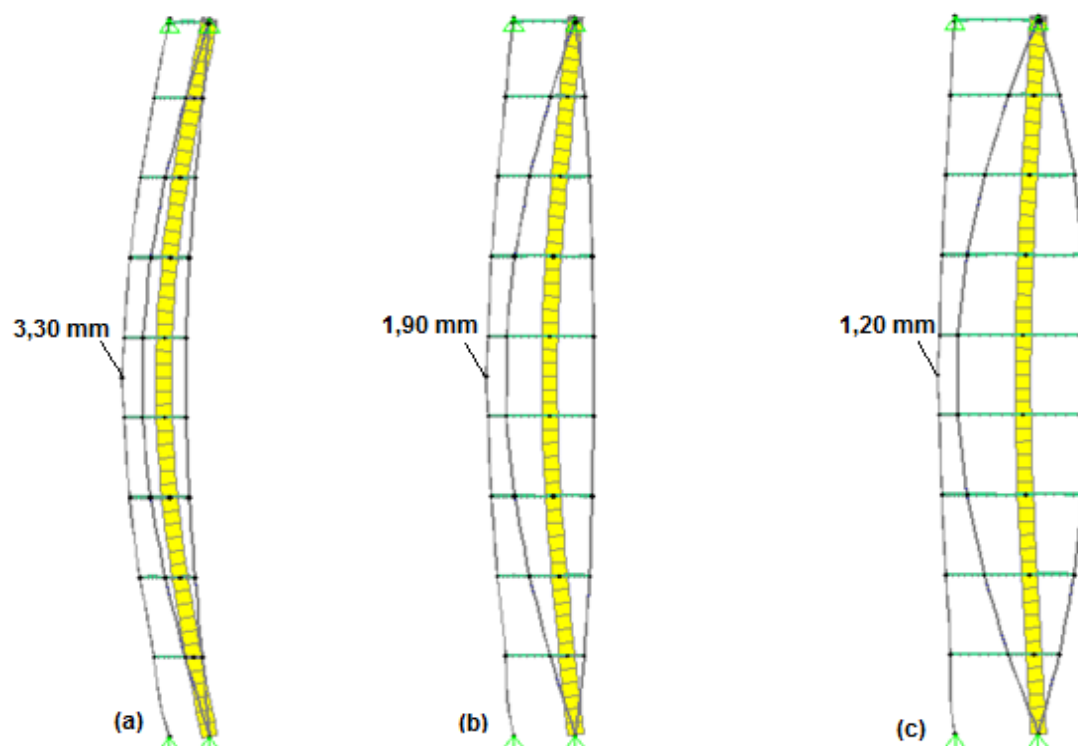


Figura 6.12 - Deformada do modelo 2 para a altura útil de: (a) - 0,60 m, (b) - 1,20 m, (c) - 1,80 m.

6.2.3 Modelo 3

Na Figura 6.13 está apresentada a solução estrutural 3 com a distância entre cabos a meio vão de 0,60 m, 1,20 m e 1,80 m.

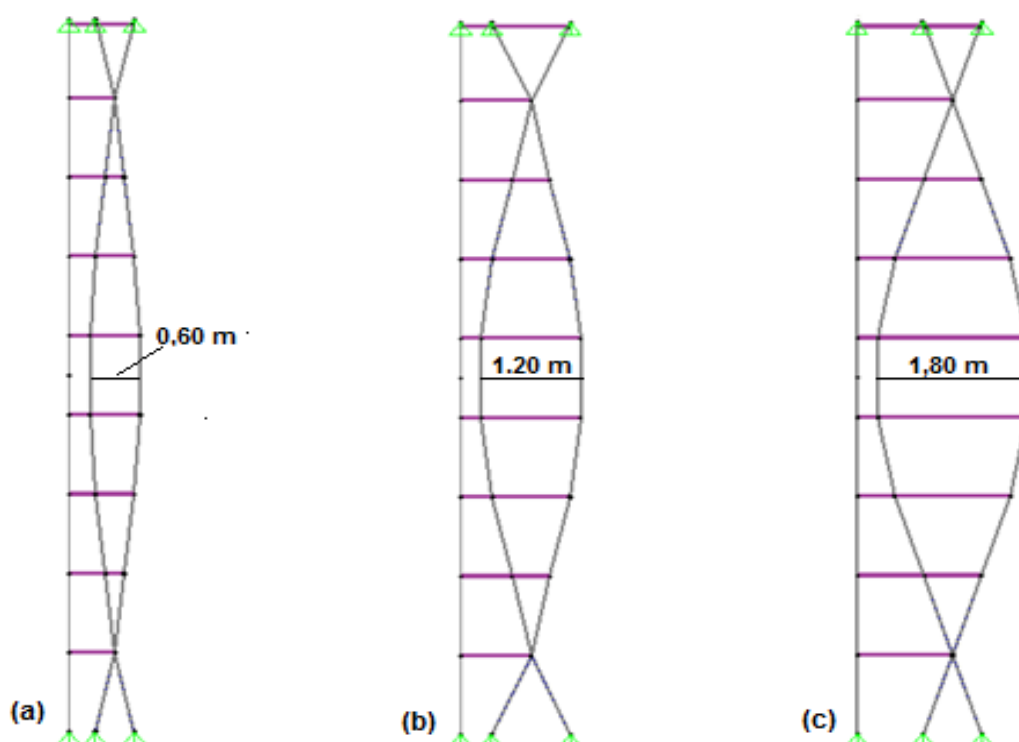


Figura 6.13 - Modelos bidimensionais do modelo 3 com altura útil de: (a) - 0,60 m, (b) - 1,20 m, (c) - 1,80 m

6.2.3.1 Esforços

O esforço axial de compressão/tracção, consoante a direcção do vento é absorvido pelos distanciadores metálicos, e maioritariamente pelos cabos parabólicos. Contudo, como os cabos não resistem às compressões, estes devem ser pré-tensionados.

No Quadro 6.7 estão apresentados os seus valores máximos para os diferentes comprimentos de braços.

Efeito do vento	Esforço axial máximo (kN)					
	Cabos			Distanciadores metálicos		
	0,60	1,20	1,80	0,60	1,20	1,80
Pressão	- 77,7	- 40,5	- 36,9	- 6,6	- 6,0	-5,8
Sucção	80,3	41,8	38,1	6,8	6,2	6,0

Quadro 6.7 - Valores de esforço axial máximo nos cabos e nos distanciadores metálicos do modelo 3 para as alturas úteis de 0,60 m, 1,20 m e 1,80m.

Os diagramas do esforço axial para a situação mais gravosa estão apresentados na Figura 6.14.

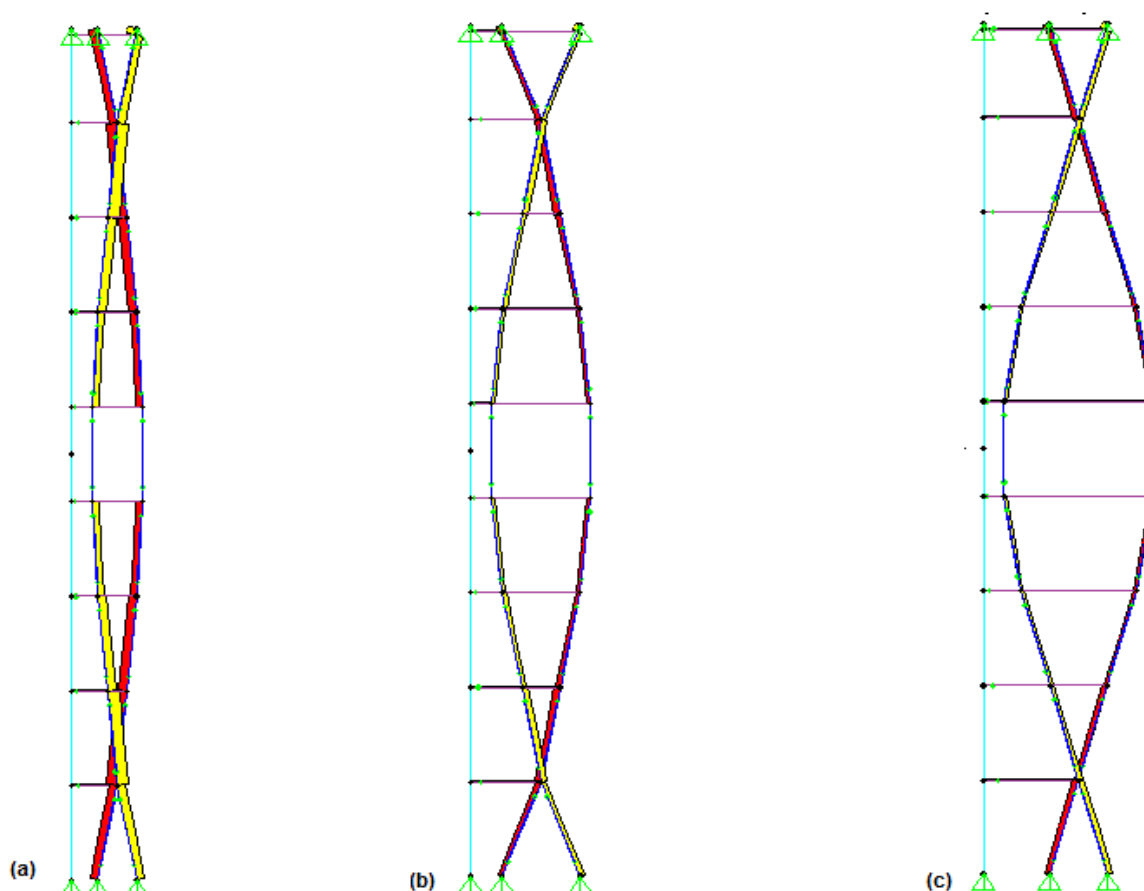


Figura 6.14 - Diagramas de esforço axial do modelo 3 para a altura útil de: (a) - 0,60 m, (b) - 1,20 m, (c) - 1,80 m.

6.2.3.2 Deslocamentos

Em termos de deformabilidade, a flecha máxima para as diferentes distâncias entre cabos, é obtida a meio vão com as configurações e valores apresentados na Figura 6.15 para a combinação frequente mais gravosa (sucção).

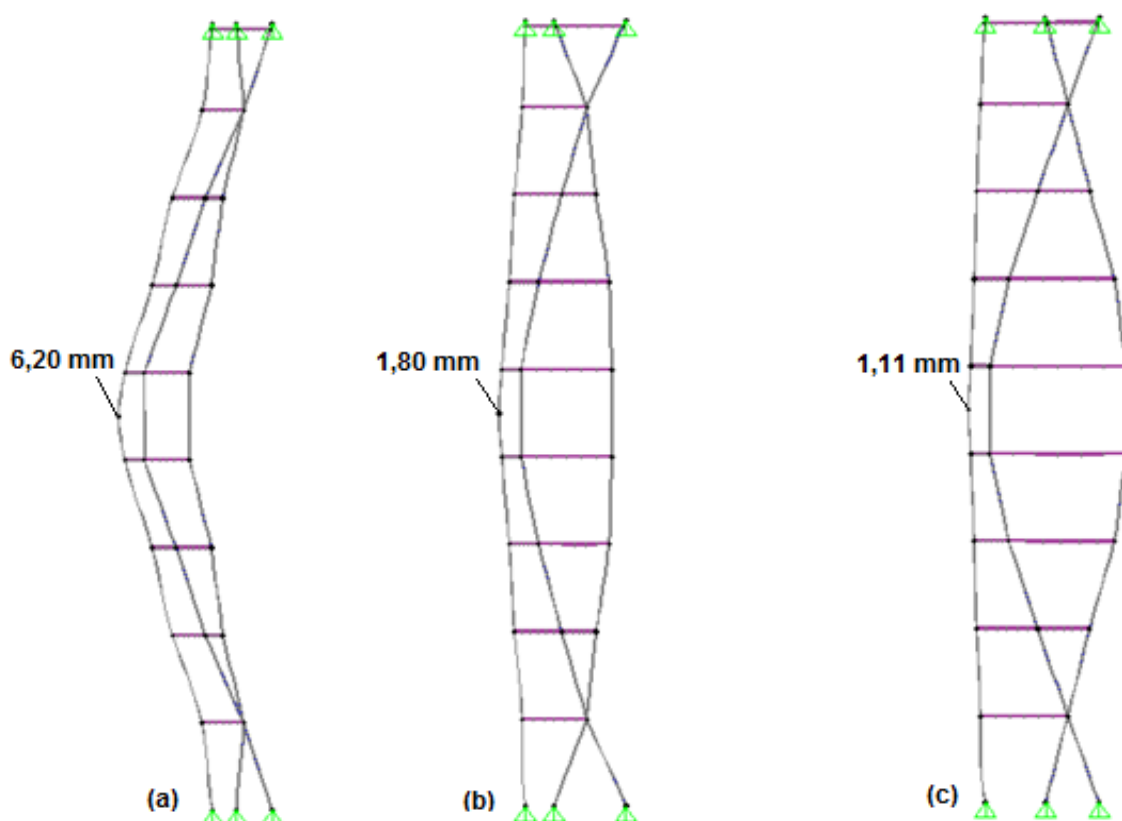


Figura 6.15 - Deformada do modelo 3 para a altura útil de: (a) - 0,60 m, (b) - 1,20 m, (c) - 1,80 m.

6.3 Verificações de segurança

Para cada tipologia devem ser feitas as verificações de segurança de acordo com o EC3 para todos os elementos metálicos, pois pode-se chegar a conclusão de que as secções consideradas inicialmente são inadequadas para suportar a acção a que está sujeita, tendo de se adoptar novas secções.

Como já foi referido no capítulo anterior, a resistência das secções em termos de esforços está assegurada, quando se verifica a seguinte Equação 5.5.

Fazendo as verificações de segurança automáticas através do SAP2000, como já foi supracitado anteriormente, obteve-se para cada modelo os seguintes resultados:

6.3.1 Modelo 1

No Quadro 6.8 estão apresentados os valores dos esforços resistentes para os elementos mais condicionantes:

		$N_{c,Rd}$ (kN)	$N_{t,Rd}$ (kN)	M_{Rd} (kN.m)	$N_{b,Rd}$ (kN)	$M_{b,Rd}$ (kN.m)
Perfis tubulares	0,60 m	82,0	119,7	1,5	82,0	1,5
	1,20 m	77,5			77,5	
	1,80 m	70,6			70,6	
Montantes do arco	0,60 m	80,7	80,7	1,0	80,7	1,0
	1,20 m	77,6			77,6	
	1,80 m	73,3			73,3	

Quadro 6.8 - Esforços resistentes para os elementos do modelo 1 para as alturas úteis de 0,60 m, 1,20 m e 1,80 m.

Observa-se pela Figura 6.16 obtida automaticamente, que há elementos em que o esforço actuante excede o esforço resistente, apresentado um rácio superior a 1,0.

Conclui-se assim que, a secção adoptada inicialmente para as alturas úteis de 0,60 m e 1,20 m não foram as mais adequadas, dado que há elementos que não verificam a condição referida na Equação 5.5.

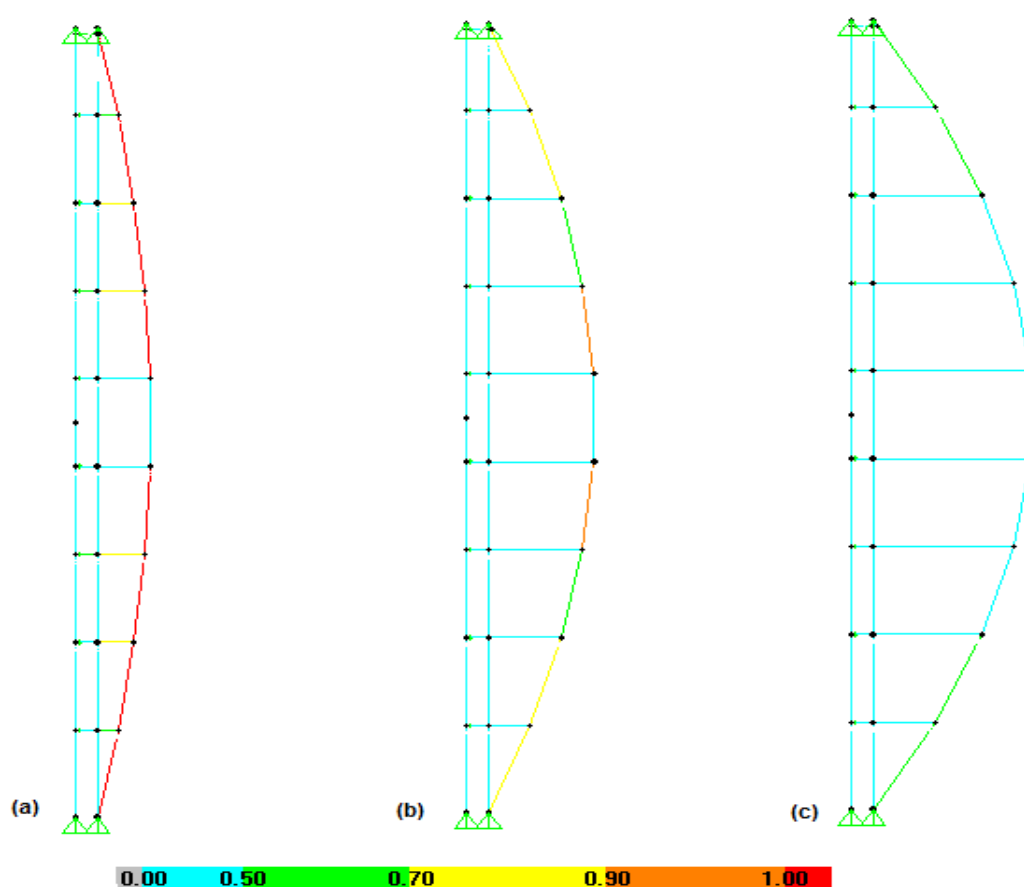


Figura 6.16 – Verificação de segurança dos elementos metálicos do modelo 1 para a altura útil de: (a) - 0,60 m, (b) - 1,20 m, (c) - 1,80 m., de acordo com o Eurocódigo 3 – parte 5.

As novas secções adoptar para o modelo 1 para as alturas úteis de 0,60 m e 1,20 m estão apresentadas nos quadros seguintes:

	D exterior (mm)	Espessura (mm)
Perfis tubulares	76,1	5
Montantes do arco	60,3	3,2

Quadro 6.9 - Novas secções adoptadas para a altura útil de 0,60 m.

	D exterior (mm)	Espessura (mm)
Perfis tubulares	48,3	4
Montantes do arco	42,4	2,6

Quadro 6.10 - Novas secções adoptadas para o modelo 1 com altura útil de 1,20 m.

6.3.2 Modelo 2

No Quadro 6.11 estão apresentados os valores dos esforços resistentes para os elementos mais condicionantes:

		N_{c,Rd} (kN)	M_{r,Rd} (kN.m)	N_{b,Rd} (kN)	M_{b,Rd} (kN.m)
Perfil HEB220	0,60 m	2258,7	205,3	2258,7	205,3
	1,20 m				
	1,80 m				
Distanciador metálico	0,60 m	92,7	1,35	92,7	1,35
	1,20 m	92,4		92,4	
	1,80 m	91,8		91,8	

Quadro 6.11 - Esforços resistentes para os elementos do modelo 2 para as alturas úteis de 0,60 m, 1,20 m e 1,80m.

Observa-se pela Figura 6.17, que há elementos em que o esforço actuante de alguns espaçadores excede o esforço resistente, apresentado um rácio superior a 1,0.

Conclui-se assim que a secção adoptada inicialmente para as alturas úteis de 0,60 m e 1,20 m, não foi a mais adequada, dado que há elementos que não verificam a condição referida na Equação 5.5.

Relativamente ao sistema de cabos parabólicos, como a força máxima admissível determinada através da tensão admissível e da área do cabo com valor igual a 80,42 kN é superior ao esforço axial actuante, verifica-se que o diâmetro considerado inicialmente (20 mm) está do lado da segurança.

Em termos de encurvadura apenas se teria de verificar para os perfis HEB, já que nos perfis tubulares não ocorre instabilidade lateral

Neste caso, não ocorre encurvadura nos perfis, visto que se verificaram os critérios apresentados nas Equações 5.6 e 5.7.

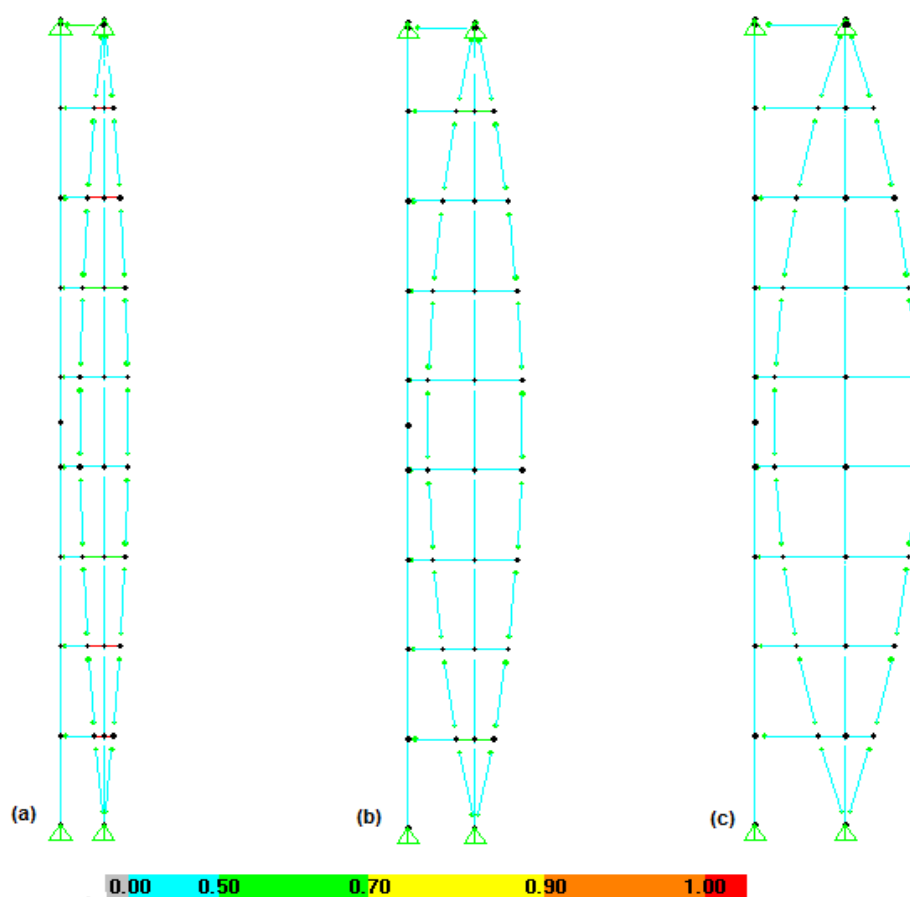


Figura 6.17 - Verificação de segurança dos elementos metálicos do modelo 2, de acordo com o Eurocódigo 3 – parte 5.

As novas secções adoptar para o modelo 2 para as alturas úteis de 0,60 m e 1,20 m estão apresentadas nos quadros seguintes:

Modelo 2	D exterior (mm)	Espessura (mm)
Cabos	20	-
Espaçadores	114,3	8
Perfil HEB 220		

Quadro 6.12 - Novas secções adoptadas para o modelo 2 para a altura útil de 0,60 m.

Modelo 2	D exterior (mm)	Espessura (mm)
Cabos	20	-
Espaçadores	101,6	8
Perfil HEB 220		

Quadro 6.13 - Novas secções adoptadas para o modelo 2 para a altura útil de 1,20 m.

6.3.3 Modelo 3

No Quadro 6.14 estão apresentados os valores dos esforços resistentes para os elementos mais condicionantes:

	$N_{c,Rd}$ (kN)	$N_{t,Rd}$ (kN)	$N_{b,Rd}$ (kN)
0,60 m	110,1	112,5	110,1
1,20 m	106,5		106,5
1,80 m	102,1		102,1

Quadro 6.14 - Esforços resistentes para os espaçadores metálicos do modelo 3 para as alturas úteis de 0,60 m, 1,20 m e 1,80m.

Quanto ao modelo 3, observa-se pela Figura 6.18, que a secção considerada para os espaçadores inicialmente verifica a segurança. O mesmo está garantido para o sistema de cabos parabólico, cuja resistência é igual aos cabos do modelo 2.

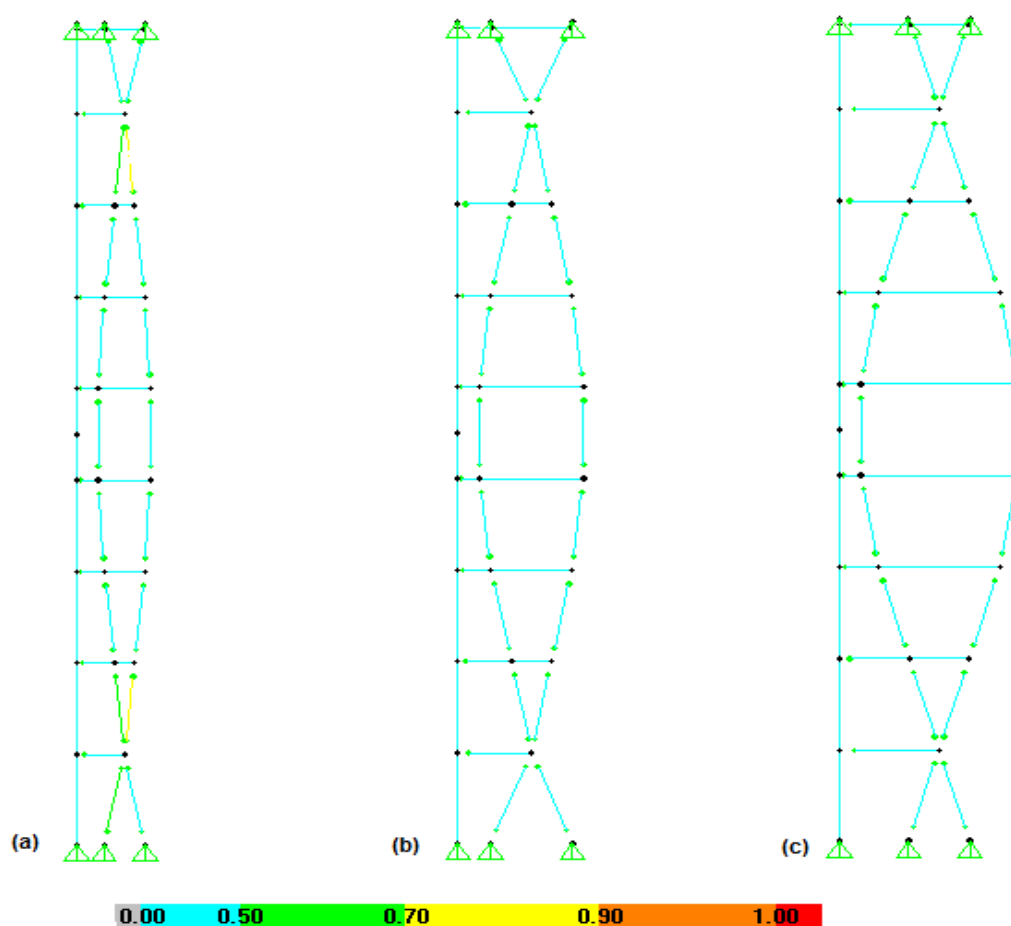


Figura 6.18 - Verificação de segurança dos elementos metálicos do modelo 3, de acordo com o Eurocódigo 3 – parte 5.

6.4 Comparação de resultados

Através da análise de sensibilidade realizada para cada tipologia estrutural, observa-se os aspectos a seguir descritos.

Com os resultados obtidos anteriormente, é possível traçar um diagrama que relaciona o deslocamento com a altura útil para cada modelo, como está apresentado na figura a seguir. Numa análise global, verifica-se que para todos os modelos com altura útil igual 0,60 m, que as estruturas são mais flexíveis, pois exibem maiores deformações quando sujeitos às mesmas condições de carga e secções. O contrário se verifica para a altura útil de 1,80 m, em que as estruturas apresentam maior rigidez.

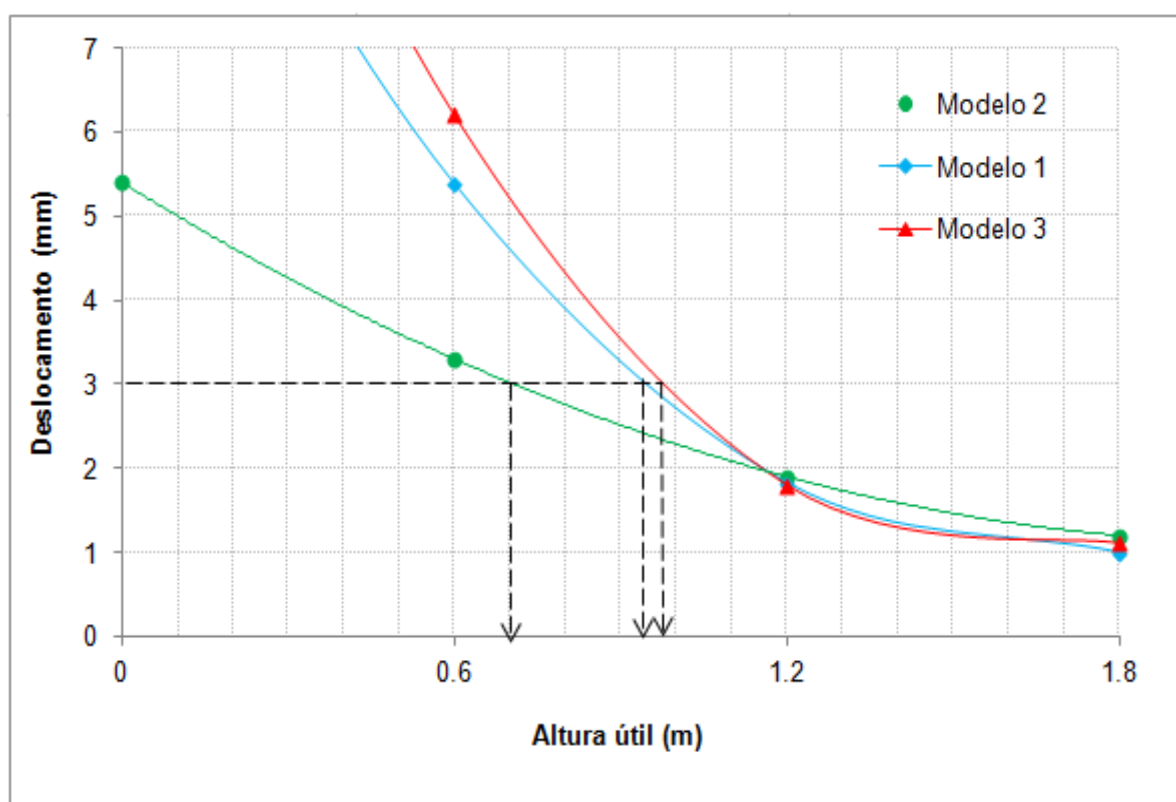


Figura 6.19 – Diagrama deslocamento - altura útil para as três soluções estruturais.

Este diagrama da Figura 6.19, pode ser utilizado como um ábaco, em que para um determinado deslocamento é possível, para cada modelo, determinar a altura útil correspondente. Por exemplo, para um deslocamento de 3 mm, as alturas úteis para os modelos 1, 2 e 3 seriam: 0,94 m; 0,7 m e 0,98 m, respectivamente.

Das três tipologias estruturais consideradas, constata-se que para as secções adoptadas, a segunda tipologia com um perfil HEB 220 é a mais rígida para alturas úteis inferiores a 1,20 m, enquanto para superiores, é o mais flexível.

Relativamente aos esforços, os montantes do arco do modelo 1 e os espaçadores dos modelos 2 e 3 são dos elementos que absorvem tanto os esforços de tracção e compressão, consoante a direcção do vento. Pelo diagrama apresentado na Figura 6.20, verifica-se que para cada modelo com as mesmas secções e situações de carga, quanto menor for a altura útil, maiores são os esforços nos elementos da estrutura.

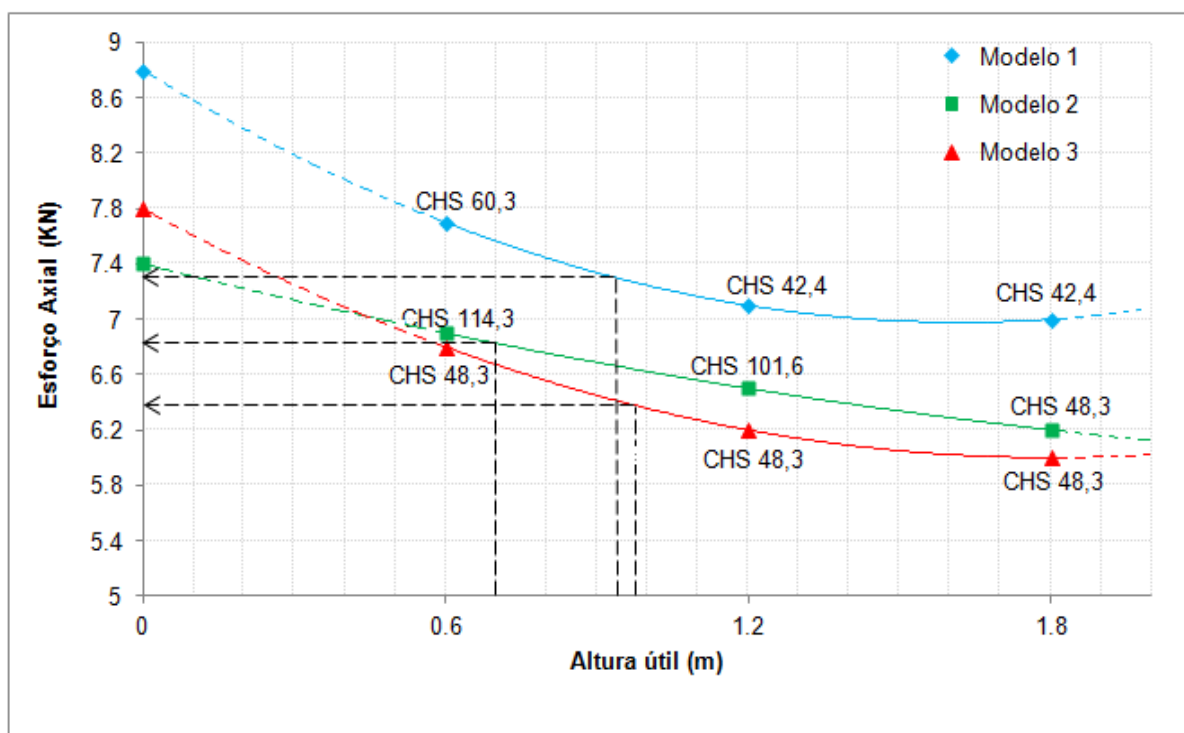


Figura 6.20 - Diagrama esforço axial - altura útil para as três soluções estruturais.

Este diagrama pode ser utilizado como um ábaco, que após determinar a altura útil adequada através do ábaco da Figura 6.19, pode-se determinar o esforço axial para cada tipologia e posteriormente a área de aço necessária que verifica a segurança de acordo com o EC3.

Para o exemplo de aplicação anterior, o esforço axial e o diâmetro do perfil CHS para um deslocamento de 3 mm são os seguintes:

	Esforço axial (KN)	Diâmetro do perfil CHS (mm)
Modelo 1	7,3	Entre 60,3 e 42,4
Modelo 2	6,8	Entre 114,3 e 101,6
Modelo 3	6,4	48,3

Quadro 6.15 – Esforço axial e diâmetro do perfil CHS para um deslocamento de 3,0 mm.

Quanto aos cabos parabólicos do modelo 2 e 3 e os perfis tubulares em forma de arco do modelo 1 são os componentes que absorvem sempre o esforço axial. Deve-se ter em atenção, que os cabos, como são elementos bastante esbeltos e flexíveis, não resistem aos esforços de compressão, pelo que devem ser pré-tensionados, para que essas compressões sejam anuladas.

O modelo 3 composto apenas por cabos parabólicos, de todos é o que permite maior transparência e leveza da fachada, mas apresenta elevados esforços de tracção e compressão, sendo necessário apresentar aplicar maiores forças de pré-tensão para eliminar as compressões comparado com o modelo 2, a presença do perfil de aço HEB faz com que os esforços nos cabos sejam menores.

7. Conclusões e desenvolvimentos futuros

7.1 Conclusão

Com a realização desta dissertação, foi possível aprofundar o conhecimento sobre o vidro, que apesar da sua rotura frágil, pode, como outros materiais de construção, ser utilizado um elemento estrutural, quando submetido a determinados processos (têmpera e laminação). Estes processos que aumentam consideravelmente a resistência mecânica do vidro com o aparecimento de sistemas de fixação mais discretos e aprimorados que os caixilhos tradicionais, permitem a construção de estruturas mais leves e transparentes.

Neste trabalho, o estudo incidiu sobre o comportamento estrutural da fachada do Teatro de Camões quando sujeita à acção do vento determinada segundo o EC1-4. Para tal, esta fachada foi modelada num programa de elementos finitos, respeitando a geometria e características dos seus constituintes. Através dessa análise, observou-se que a rede de cabos horizontais de contraventamento, consoante a direcção do vento, apresenta cabos em compressão, pelo que estes têm de ser pré-tensionados de forma a eliminá-las.

Quanto aos perfis de aço HEB 300 e os espaçadores que absorvem os momentos flectores e o esforço axial, respectivamente, devido à acção do vento verificam a segurança em relação ao estado limite último, de acordo com as prescrições apresentadas no Eurocódigo 3.

Relativamente aos painéis de vidro, com as dimensões e a espessura da fachada real, não verificam a segurança em termos de tensão, de acordo com a regulamentação EN 13474-1. Tal aconteceu, devido ao facto do valor da pressão do vento determinado segundo o Eurocódigo 1-4 ser superior ao considerado no projecto. Contudo, admitindo o limite apresentado no catálogo do fabricante "Saint Gobain Glass", a segurança está verificada.

Devido a inexistência de informação normativa para este tipo de sistema de fixação foi admitido um limite de flecha admissível ($L/250$), de forma a controlar as deformações excessivas da fachada. De acordo com esse deslocamento limite, a segurança relativa ao estado limite de utilização está garantida.

Para além da análise da anterior, também foi feito um estudo paramétrico considerando três tipologias estruturais alternativas, modelo 1, modelo 2 e modelo 3, compostas por perfis de aço CHS em forma de arco, por cabos parabólicos tensionados e perfis de aço HEB, e só por cabos parabólicos tensionados, respectivamente. As suas secções foram calibradas, de forma a garantir que o seu deslocamento máximo fosse igual ao da solução original para uma altura útil de referência de 1,20 m.

Com o objectivo de obter ábacos para cada tipologia proposta, que, permitam facilmente determinar a altura útil e a secção transversal correspondente dos seus elementos estruturais, foi realizada uma análise de sensibilidade em termos de esforços e deslocamentos para diferentes alturas úteis.

Da análise efectuada conclui-se que:

- Para cada tipologia estrutural em estudo, quanto maior a altura útil, mais rígida é a estrutura, levando assim a menores deslocamentos.
- O modelo 3 composto apenas por cabos parabólicos tensionados para resistir à tracção e perfis CHS horizontais para resistir à compressão, é o modelo mais flexível comparado com os restantes até a altura útil de 1,20 m. A partir dessa altura, o modelo 2 composto por cabos parabólicos e o perfil HEB220 é o mais flexível.
- Em termos de esforços, à medida que se aumenta a altura útil de cada tipologia estrutural, os esforços diminuem.

Esta análise é de elevada importância já que permitiu obter as secções necessárias para os elementos estruturais de cada um dos modelos considerados resistirem às acções que estão sujeitos em segurança.

Para a escolha da melhor solução, além de ser feita uma análise estrutural, deve ser realizada uma análise respeitante aos custos. O objectivo é conceber estruturas que satisfaçam os requisitos de segurança e de utilização durante a sua vida útil, o mais economicamente possível.

A ausência de perfis tubulares em arco e perfis HEB no modelo 3 acentua ainda mais a transparência da fachada. Do ponto de vista económico, apesar da menor área de aço, este modelo acaba por ser o mais dispendioso, devido à complexidade do processo de montagem e pela simplicidade e inovação que este sistema proporciona.

7.2 Desenvolvimentos futuros

Neste trabalho foi feito um estudo do comportamento da fachada em vidro, quando sujeita à acção do vento. Para desenvolvimentos futuros sugere-se:

- Fazer um estudo do comportamento sísmico da fachada;
- Analisar o comportamento da fachada com diferentes tipologias de contraventamentos horizontais;
- Avaliar o comportamento da fachada em estudo, com outros sistemas de fixação em que o vidro também seja utilizado como elemento estrutural.
- Fazer uma análise mais detalhada, da distribuição de esforços junto aos furos dos painéis.

Bibliografia

- [1] AKERMAN, M. “*Natureza, Estrutura e Propriedades do Vidro*”. CETEV, Novembro 2000.
- [2] BOS, F.: “*Safety Concepts in Structural Glass Engineering*”. Ter Verkrijging Van de Graad Van Doctor, Technische Universiteit Delft, 2009.
- [3] BUSS, A.; DELVAZ, C.; Piva, M.; Delgado, M.: “*Fixações*”. 2006.
- [4] CEN, Bruxelas, Bélgica: NPEN 1991-1-4. “*Acções em estruturas Parte 1-4: Acções gerais – Acções do vento*”. 2010.
- [5] CEN, Bruxelas, Bélgica: NPEN 1993-1-1, Eurocódigo 3. “*Projecto de estruturas de aço. Part 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*”. 2010.
- [6] CEN, Bruxelas, Bélgica: prEN-13474-1-1. “*Glass in building – Design of glass panes – Part 1: General basis of design*”. 1999.
- [7] DIN, Alemanha: EN 572-1-2004, “*Glass in building. Part 1: Definitions and general physical and mechanical properties*”. 2004.
- [8] FILHO, A. “*Estados limites de serviço em estruturas de concreto armado*”. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.
- [9] GIACOMINI, E.: “*Material - O vidro*”. Dissertação para obtenção de Mestre, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- [10] HALDIMANN, M. “*Fractura Strength of Structural Glass Elements – Analytical and Numerical Modelling, Testing and Design*”. Faculté de L’Environnement Naturel, Architectural et Construit, 2006.
- [11] HENRIQUES, P.: “*Comportamento ao fogo do vidro estrutural*”. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Eng. Civil, Universidade de Aveiro, 2010.
- [12] KALLIONIEMI, J.: “*Joints and Fastenings in Steel-Glass Facades*”. Master’s Thesis, University of Technology, Helsinki, 1999.
- [13] LOUÏTER, P.: “*Fragile yet Ductile. Structural Aspects of Reinforced Glass Beams*”. Ter Verkrijging Van de Graad Van Doctor, Technische Universiteit Delft, Abril, 2011.
- [14] MARTINS, J. Pereira, P. “*Colas e Mástiques*”. 2ª Edição, 2006.
- [15] MARTINS, J., Pinto, E. “*O vidro*”. 1ª edição, 2004.
- [16] MOURA, A. “*Fachadas em Vidro Exterior Agrafado*”. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005.
- [17] PATTERSON, M.: “*Structural Glass Facades: A Unique Building Technology*”. Faculty of the School of Architecture University of Southern California, 2008.
- [18] QUARESMA, P. *Sistema de Fachada Planar – Vidro Exterior Agrafado*. Instituto Superior Técnico, Junho, 2002.
- [19] RAMOS, A. Estruturas de aço. Apontamentos das aulas do professor João Rocha. 2007
- [20] TRACI, F.: “*Avaliação de materiais para uso em janelas automotivas de segurança*”. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Eng. Automotiva, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

- [21] VALARINHO, L.: "Construção em *vidro estrutural – Comportamento estrutural de vigas mistas vidro-GFRP*". Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Eng. Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2010
- [22] WHITE, R. "*Glass as a Structural Material*". Report, Kansas State University, Kansas, 2007.
- [23] WURM, J: "*Glass Structures. Design and Constructin of Self-Supporting Skins*", Birkhauser (33):31-64, 2007.
- [24] www.acmo.fr/architecture/architecture.htm, 2012.
- [25] www.afeal.com.br/portal/pagina.php?id=155, 2012.
- [26] www.anandtech.com/show/4225/the-ipad-2-review/13, 2012.
- [27] www.andiv.com.br/downloads/ovidroplano_413_maio07.pdf, 2011.
- [28] www.arcoweb.com.br/tecnologia/entre-vidros-e-perfis-componentes-metalicos-07-10-2005.html, 2012
- [arcoweb.com.br/tecnologia/entre-vidros-e-perfis-componentes-metalicos-07-10-2005.html], 2012.
- [29] www.dowcorning.com/content/publishedlit/62-1465-11.pdf, 2012
- [30] www.edimetal.pt, 2011.
- [31] www.greatbuildings.com/buildings/Palm_House_at_Kew_Gardens.html, 2012.
- [32] http://jroxoaluminios.com/index.php?option=com_content&view=article&id=32&Itemid=38, 2011.
- [33] www.macalloy.com/, 2012.
- [34] www.mapei.com, 2012.
- [35] www.martinsferreira.pt/, 2012.
- [36] www.metalica.com.br/materiais-para-fachadas-sistema-spider-glass, 2012.
- [37] www.noticias.vidrado.com/artigos/resistencia-do-vidro-ao-choque-termico/, 2011.
- [38] www.pilkington.com/south-america/brazil/portuguese/about+pilkington/history+of+float+in+brazil/history+of+glass+brazil.htm, 2011.
- [39] www.products.construction.com/swts_content_files/1179/313632.pdf, 2011.
- [40] www.saint-gobain-glass.com/upload/files/3.1.2_propriedades_fisicas.pdf, 2011.
- [41] www.saint-gobain-glass.com/b2c/default.asp?nav1=st&nav2=glossaire, 2012.
- [42] www.sites.google.com/site/arquiteturaemvidro/historico, 2011.
- [43] www.SunGuardGlass.com, 2011.
- [44] www.vitro.com/vitro_chaves/templex2.htm, 2012.
- [45] www.wikipedia.org/wiki/Hardwick_Hall, 2011.

Anexo A

Normas de certificação e normas de ensaio do vidro

EN 572-1:2004	Basic soda lime silicate glass products - Part 1: Definitions and general physical and mechanical properties
EN 572-2:2004	Basic soda lime silicate glass products - Part 2: Float Glass
EN 572-3:2004	Basic soda lime silicate glass products - Part 3: Polished wire glass
EN 572-4:2004	Basic soda lime silicate glass products - Part 4: Drawn sheet glass
EN 572-5:2004	Basic soda lime silicate glass products - Part 5: Patterned glass
EN 572-6:2004	Basic soda lime silicate glass products - Part 6: Wired patterned glass
EN 572-7:2004	Basic soda lime silicate glass products - Part 7: Wired or unwired channel shaped glass
EN 572-8:2004	Basic soda lime silicate glass products - Part 8: Supplied and final cut sizes
EN 572-9:2004	Basic soda lime silicate glass products - Part 9: Evaluation of conformity/Product standard
ASTM C 1036.2001	Standard Specification for Flat Glass
EN 1748-1-1:2004	Special basic products - Borosilicate glasses - Part 1-1: Definitions and general physical and mechanical properties
EN 1748-1-2:2004	Special basic products - Borosilicate glasses - Part 1-2: Evaluation of conformity/Product standard
EN 1748-2-1:2004	Special basic products - Glass Ceramics - Part 1-1: Definitions and general physical and mechanical properties
EN 1748-2-2:2004	Special basic products - Glass ceramics - Part 1-2: Evaluation of conformity/Product standard
EN 1051-1:2003	Glass blocks and glass paver units - Part 1: Definitions and description
EN 1051-2:2003	Glass blocks and glass paver units - Part 2: Evaluation of conformity
EN1863-1:2000	Heat strengthened sola lime silicate glass - Part 1: Definition and description
EN1863-2:2004	Heat strengthened sola lime silicate glass - Part 2: Evaluation of conformity/Product standard
EN 12150-1:2000	Thermally toughened sola lime silicate safety glass - Part 1: Definition and description
EN 12150-2:2000	Thermally toughened sola lime silicate safety glass - Part 2: Evaluation of conformity/Product standard
EN 14179-1:2005	Heat soaked thermally toughened soda lime silicate safety glass - Part 1: Definition and description
EN 14179-2:2005	Heat soaked thermally toughened soda lime silicate safety glass - Part 2: Evaluation of conformity/Product standard
EN 13024-1:2002	Thermally toughened borosilicate safety glass - Part 1: Definition and description
EN 13024-2:2004	Thermally toughened borosilicate safety glass - Part 2: Evaluation of conformity/Product standard
EN 14321-1:2005	Thermally toughened alkaline earth silicate safety glass - Part 1: Definition and description
EN 14321-2:2005	Thermally toughened alkaline earth silicate safety glass - Part 2: Evaluation of conformity/Product standard
EN 12337-1:2000	Chemically strengthened sola lime silicate glass - Part 1: Definition and description
EN 12337-2:2004	Chemically strengthened sola lime silicate glass - Part 2: Evaluation and

	conformity/Product standard
EN 1096-1:1998	Coated glass - Part 1: Definition and classification
EN 1096-2:2001	Coated glass - Part 2: Requirements and test methods for class A, B and S coatings
EN 1096-3:2001	Coated glass - Part 3: Requirements and test methods for class C and D coatings
EN 1096-4:2004	Coated glass - Part 4: Evaluation of conformity/Product standard
ISO 12543-1:1998	Laminated glass and laminated safety glass - Part 1: Definitions and description of components parts
ISO 12543-2:2004	Laminated glass and laminated safety glass - Part 2: Laminated safety glass
ISO 12543-3:1998	Laminated glass and laminated safety glass - Part 3: Laminated glass
ISO 12543-4:1998	Laminated glass and laminated safety glass - Part 4: Test methods for durability
ISO 12543-5:1998	Laminated glass and laminated safety glass - Part 5: Dimensions and edge finishing
ISO 12543-6:1998	Laminated glass and laminated safety glass - Part 6: Appearance
EN 14449:2005	Laminated glass and laminated safety glass - Evaluation of conformity/Product standard
EN 1279-1:2004	Insulating glass units - Part 1: Generalities, dimensional tolerances and rules for the system description
EN 1279-2:2002	Insulating glass units - Part 2: Long term test method and requirements for moisture penetration
EN 1279-3:2002	Insulating glass units - Part 3: Long term test method and requirements for gas leakage rate and for gas concentration tolerances
EN 1279-4:2002	Insulating glass units - Part 4: Methods for test for the physical attributes of edge seals
EN 1279-5:2005	Insulating glass units - Part 5: Evaluation of conformity/Product standard
EN 1279-6:2002	Insulating glass units - Part 6: Factory production control and periodic tests
ASTM C 1048-04	Standard Specification for Heat-Treated Flat Glass - Kind HS, Kind FT Coated and Uncoated
ASTM C 1172-03	Standard Specification for Laminated Architectural Flat Glass
ASTM C 1376-03	Standard Specification for Pyrolytic and Vacuum Deposition Coatings on Flat Glass
ASTM C 1422-99	Standard Specification for Chemically Strengthened Flat Glass
ASTM C 1464-06	Standard Specification for Bent Glass
ASTM C 1503-01	Standard Specification for Silvered Flat Glass Mirror
EN 356	Glass in building – Security glazing – Testing and classification of resistance against manual
EN 12600	Glass in building – Impact test method and classification for flat glass

Quadro A.1 - Normas de certificação e normas de ensaio dos vários tipos vidro.

Anexo B

Quantificação da acção do vento que actua sobre a fachada existente segundo o EC1-4 [4]

Para a quantificação do valor característico do vento que actua sobre a fachada, segundo a metodologia apresentada pelo Eurocódigo 1 - parte 4, considera-se este actuar sobre as quatro fachadas do Teatro de Camões, isoladamente.

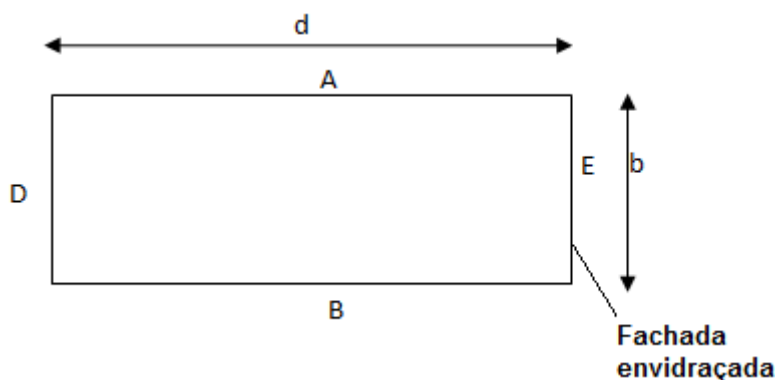


Figura B. 1 – Denominação das fachadas do Teatro de Camões.

B.1 Vento actuar sobre a fachada envidraçada (fachada E)

B.1.1 Valor de referência da velocidade do vento, v_b

O valor básico de referência da velocidade do vento é determinado pela seguinte expressão:

$$v_b = c_{dir} \times c_{season} \times v_{b,0} \quad (B.1)$$

com:

c_{dir} – Coeficiente de direcção; o valor recomendado é 1,0;

c_{season} – Coeficiente de sazão, que traduz a época do ano; o valor recomendado é 1,0;

$v_{b,0}$ – Valor básico da velocidade de referência do vento (Quadro B.1), cujo depende do tipo de zona.

Segundo o Anexo Nacional, Portugal encontra-se dividido em duas zonas, A e B.

Zona A – Maioria do território, excepto as regiões pertencentes à zona B;

Zona B – Arquipélagos dos Açores e da Madeira e as regiões do continente situadas numa faixa costeira com 5 Km de largura ou a altitudes superiores a 600 m.

Zona	$v_{b,0}$ (m/s)
A	27
B	30

Quadro B.1 - Valor básico da velocidade de referência do vento.

Para o caso em estudo, a estrutura encontra-se na zona B de Portugal, logo o valor básico da velocidade de referência do vento segundo o Quadro B.1 é igual a 30m/s.

Então v_b é igual a:

$$v_b = 1,0 \times 1,0 \times 30 = 30\text{m/s}$$

B.1.2 Velocidade média do vento a uma altura z acima do solo, $v_m(z)$

A velocidade média do vento, que tem em conta os efeitos da rugosidade do terreno e da orografia, é determinada pela Equação B.2, de acordo com o EC1-4.

$$v_m(z) = c_r(z) \times c_o(z) \times v_b \quad (\text{B.2})$$

com:

$c_o(z)$ – Coeficiente de orografia; o valor recomendado é 1,0;

$c_r(z)$ – Coeficiente de rugosidade, este valor para estruturas com altura z entre $z_{\min} \leq z \leq 200\text{m}$ calcula-se da seguinte forma:

$$c_r(z) = k_r \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (\text{B.3})$$

E para estruturas com $z \leq z_{\min}$, determina-se da seguinte forma:

$$c_r(z) = c_r(z_{\min}) \quad (\text{B.4})$$

em que:

z_0 – Comprimento de rugosidade (Quadro B.2);

k_r – Coeficiente de terreno, o qual se calcula pela seguinte expressão:

$$k_r = 0,19 \times \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} \quad (\text{B.5})$$

com:

$z_{0,II}$ – Considera-se 0,05 m que corresponde a um terreno tipo II;

z_{min} – Altura mínima (Quadro B.2).

Categoria do terreno	z_0 (m)	z_{min} (m)
I Mar ou zona costeira exposta aos ventos do mar	0,005	1
II Zona de vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados (árvores, edifício) com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura	0,05	3
III Zona com uma cobertura regular de vegetação ou edifícios, ou com obstáculos isolados com separações entre si de, no máximo, 20 vezes a sua altura (por exemplo: aldeias, zonas suburbanas, florestas permanentes)	0,3	8
IV Zona na qual pelo menos 15% da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15m	1,0	15

Quadro B.2 - Categorias e parâmetros de terreno.

Para o cálculo da velocidade média do vento que actua sobre a fachada em estudo, primeiro são determinados os coeficientes anteriormente descritos.

A altura acima solo da fachada do Teatro de Camões (z) é de 13,12 m e considerando que se situa no terreno tipo I (Quadro B.2) obtêm-se o comprimento de rugosidade $z_0 = 0,005$ m e a altura mínima $z_{min} = 1$ m.

O coeficiente de terreno k_r foi determinado pela Equação B.5, e é igual a:

$$k_r = 0,19 \times \left(\frac{0,005}{0,05} \right)^{0,07} = 0,162$$

Como a altura da fachada se encontra entre $1 \text{ m} \leq 13,12 \text{ m} \leq 200 \text{ m}$, o coeficiente de rugosidade calcula-se pela Equação B.3.

$$c_r(13,12) = 0,162 \times \ln \left(\frac{13,12}{0,005} \right) = 1,273$$

E por fim, pela equação B.2, a velocidade média é igual a:

$$v_m(z) = 1,273 \times 1 \times 30 = 38,193 \text{ m/s}$$

B.1.3 Intensidade de turbulência à altura z , $I_v(z)$

Para estruturas com altura z entre $z_{min} \leq z \leq 200 \text{ m}$, a intensidade de turbulência calcula-se da seguinte forma:

$$I_v(z) = \frac{k_I}{c_o(z) \times \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)} \quad (\text{B.6})$$

E para estruturas com $z \leq z_{\min}$, determina-se da seguinte forma:

$$I_v(z) = I_v(z_{\min}) \quad (\text{B.7})$$

em que:

k_t – Coeficiente de turbulência; valor recomendado é 1,0;

Como já referido, a altura da fachada em análise é 13,12 m encontrando-se entre o valor de z_{\min} e 200 m, sendo a intensidade de turbulência é determinada pela equação B.6.

$$I_v(z) = \frac{1,0}{1,0 \times \ln\left(\frac{13,12}{0,005}\right)} = 0,127$$

B.1.4 Pressão dinâmica de pico à altura z , $q_p(z)$

A pressão dinâmica de pico é determinada através da seguinte expressão:

$$q_p(z) = [1 + 7 \times I_v(z)] \times \frac{1}{2} \times \rho \times v_m^2(z) \quad (\text{B.8})$$

em que:

ρ – Massa volúmica do ar; o valor recomendado é 1,25 Kg/m³.

Para a fachada com altura de 13,12 m, a pressão dinâmica de pico determinada através da Equação B.8, corresponde ao valor de:

$$q_p(13,12) = [1 + 7 \times 0,127] \times \frac{1}{2} \times 0,00125 \times 38,193^2 = 1,722 \text{ kPa}$$

B.1.5 Coeficientes de pressão exterior e interior

Os coeficientes de pressão exterior c_{pe} podem ser aplicados a edifícios ou apenas a partes destes. Estes valores dependem das dimensões da superfície carregada A , sendo fornecidos para superfícies carregadas com $A \leq 1 \text{ m}^2$ ($c_{pe,1}$ - coeficiente local) e de 10 m^2 ($c_{pe,10}$ - Coeficiente global) .

O procedimento recomendado para superfícies com $1 \text{ m}^2 < A < 10 \text{ m}^2$ é indicado na Figura B.1 com base na seguinte expressão:

$$c_{pe} = c_{pe,1} - (c_{pe,1} - c_{pe,10}) \times \log_{10} A \quad (\text{B.9})$$

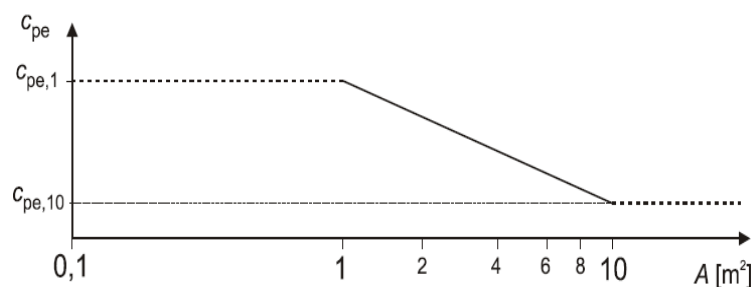


Figura B.2 - Procedimento recomendado para a determinação do coeficiente de pressão exterior c_{pe} em edifícios para áreas carregadas entre $1m^2$ e $10m^2$.

Para paredes verticais de edifícios de planta rectangular podem ser definidos em função das dimensões h e d através do quadro seguinte:

Zona	A		B		C		D		E	
h/d	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,7	
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	
$\leq 0,25$	1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0	-0,3	

Quadro B.3 – Valores recomendados dos coeficientes de pressão exterior para paredes verticais de edifícios de planta rectangular.

As zonas A, B, C, D e E para a determinação dos coeficientes de pressão exterior estão definidos na Figura B.2.

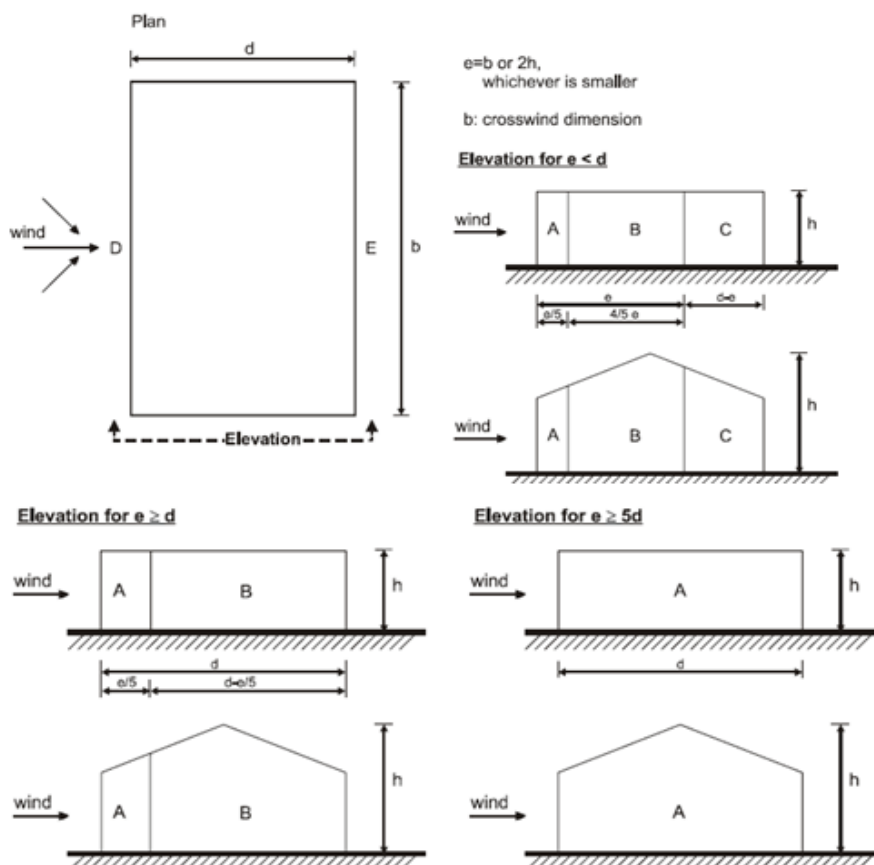


Figura B.3 – Zonas em paredes verticais.

As pressões interiores e exteriores devem ser consideradas actuar simultaneamente para a combinação mais desfavorável.

O coeficiente de pressão interior, c_{pi} , depende da dimensão e da distribuição das aberturas na envolvente do edifício.

No caso do edifício com uma face predominante, isto é, quando a área das aberturas nessa face é pelo menos o dobro da área das aberturas e de outras vias de passagem de ar nas faces restantes do edifício considerado, a pressão interior deve ser determinada pelas seguintes expressões:

- Quando a área das aberturas na face predominante é igual ao dobro da área das aberturas nas faces restantes,

$$c_{pi}=0,75 \times c_{pe} \quad (B.10)$$

- Quando a área das aberturas na face predominante é igual a, pelo menos, três vezes a área das aberturas nas faces restantes,

$$c_{pi}=0,90 \times c_{pe} \quad (B.11)$$

Para a fachada em estudo, inicialmente terá de se determinar a relação entre h e d , e as zonas da fachada para obter o valor de $c_{pe,1}$ e $c_{pe,10}$ através do Quadro B.3.

$$\frac{h}{d} = \frac{13,12}{92} = 0,143 \leq 0,25$$

Logo pelo Quadro B.3, $c_{pe,1} = 1$ e $c_{pe,10} = 0,7$

O $c_{pe,10}$ corresponde ao valor do coeficiente de pressão exterior quando o vento actua sobre a estrutura para uma área de 10 m^2 e o $c_{pe,1}$ corresponde ao valor do coeficiente de pressão exterior quando o vento actua sobre o painel de área 1 m^2 . Como o painel, na realidade tem uma área de $2,51 \text{ m}^2$, por interpolação (Equação B.9) determina-se o coeficiente de pressão correspondente.

$$c_{pe,2,5} = 1 - (1 - 0,7) \times \log_{10}(2,51) = 0,88$$

Relativamente ao coeficiente de pressão interior, como a área das aberturas na face predominante é igual a, pelo menos, três vezes a área das aberturas nas faces restantes é igual a

$$c_{pi,10} = 0,90 \times 0,7 = 0,630$$

$$c_{pi,2,5} = 0,90 \times 0,88 = 0,792$$

B.1.6 Pressão exercida pelo vento nas superfícies exteriores e interiores

A pressão exterior é obtida através da seguinte expressão:

$$w_e = q_p(z_e) \times c_{pe} \quad (B.12)$$

em que:

$q_p(z_e)$ – Pressão dinâmica de pico;

c_{pe} – Coeficiente de pressão exterior;

z_e – Altura de referência para a pressão exterior, que no caso de paredes verticais de edifícios de planta rectangular depende da relação h/b , a qual está apresentada na Figura B.3 para as diferentes situações.

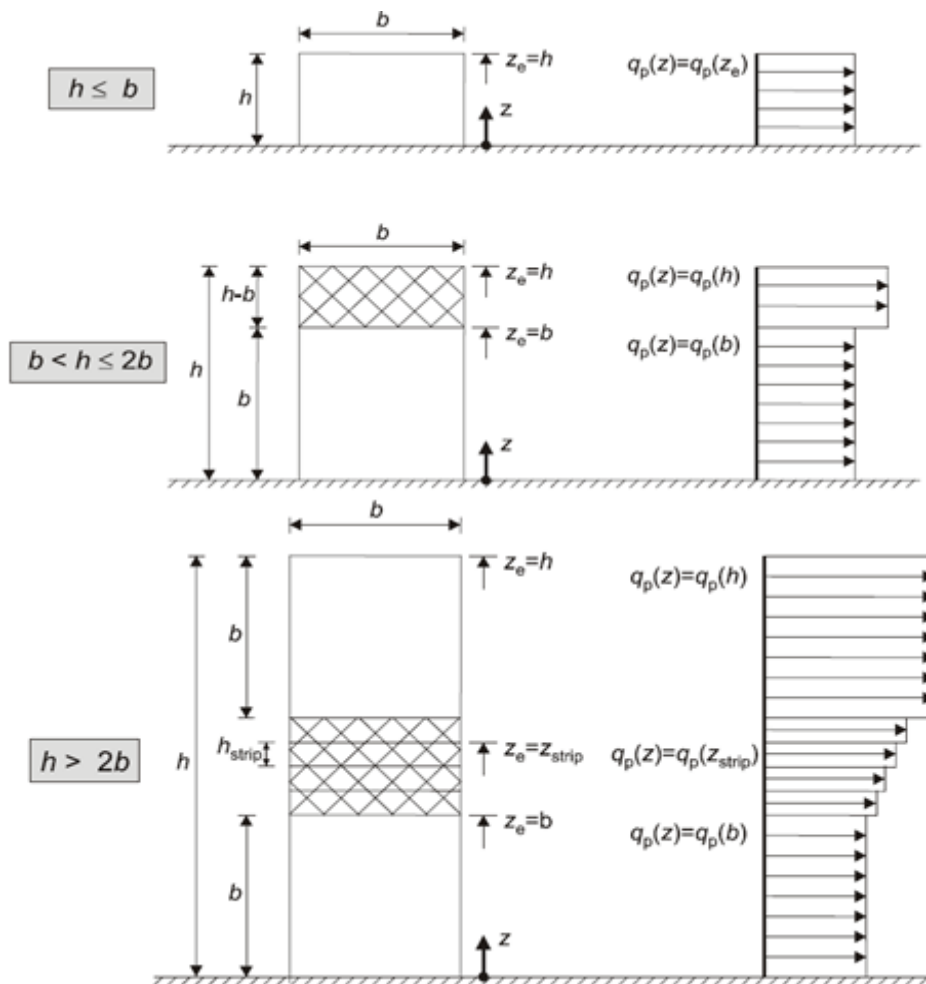


Figura B.4 – Altura de referência z_e em função de h e b , e corresponde perfil de pressão dinâmica.

Relativamente à pressão exercida pelo vento nas superfícies interiores de uma construção, w_i , é obtida pela seguinte expressão:

$$w_i = q_p(z_i) \times c_{pi} \quad (B.13)$$

em que:

$q_p(z_i)$ – Pressão dinâmica de pico;

z_i – Altura de referência para a pressão interior, a qual é igual a altura de construção;

c_{pi} – Coeficiente de pressão interior.

Pelas equações B12 e B13, determina-se as pressões exteriores e interiores actuar na fachada envidraçada.

$$w_{e,10}=1,722 \times 0,7=1,206 \text{ kPa}$$

$$w_{e,2,5}=1,722 \times 0,88=1,516 \text{ kPa}$$

$$w_{i,10}=1,722 \times 0,63=1,085 \text{ kPa}$$

$$w_{i,2,5}=1,722 \times 0,792= 0,697 \text{ kPa}$$

Para o cálculo do efeito da acção do vento na fachada/painel terá de se considerar a situação mais condicionante das duas possíveis:

➤ Porta aberta

$$w_{10} = w_{e,10} - w_{i,10} = 0,121 \text{ kPa}$$

$$w_{2,5} = w_{e,2,5} - w_{i,2,5} = 0,819 \text{ kPa}$$

➤ Porta fechada

$$w_{10} = w_{e,10} = 1,206 \text{ kPa}$$

$$w_{2,5} = w_{e,2,5} = 1,516 \text{ kPa}$$

A situação mais condicionante é a porta fechada

B.2 Vento actuar sobre a fachada D

O vento actuar sobre a fachada D vai provocar sucções na fachada envidraçada, as quais são determinadas da mesma forma que no caso anterior.

Obtêm-se os resultados apresentados nos quadros seguintes:

$z_{min}(m)$	$z_0 (m)$	k_r	c_r	$v_m (m/s)$	Zona II
1	0,05	0,19	1,058275	31,74826	

Quadro B.4 - Altura mínima, comprimento de rugosidade, coeficiente de terreno e de rugosidade e velocidade média com o vento actuar perpendicularmente à fachada D.

I_v	q_p (kPa)
0,180	1,422

Quadro B.5 - Intensidade de turbulência e pressão dinâmica de pico do vento sobre a fachada D.

Os valores das pressões provocadas na fachada E, devido ao vento actuar sobre a fachada D estão apresentados no quadro seguinte:

$C_{pe,1}$	$C_{pe,2.5}$	$C_{pe,10}$	$w_{e,2.5}$ (kPa)	$w_{e,10}$ (kPa)
-0,3	-0,30	-0,3	-0,427	-0,427

Quadro B.6 - Coeficientes de pressão exterior e sucções provocadas na fachada E.

B.3 Vento actuar sobre a fachada A ou B

O vento actuar sobre a fachada A ou sobre a fachada B vai provocar sucções na fachada envidraçada, as quais são determinadas da mesma forma que nos casos anteriores.

Obtêm-se os resultados apresentados nos quadros seguintes:

$z_{min}(m)$	z_0 (m)	k_r	c_r	v_m (m/s)	Zona III
1	0,3	0,215	0,814	24,4129414	

Quadro B.7 - Altura mínima, comprimento de rugosidade, coeficiente de terreno e de rugosidade e velocidade média com o vento actuar perpendicularmente à fachada A ou B.

I_v	q_p (kPa)
0,265	1,063

Quadro B.8 - Intensidade de turbulência e pressão dinâmica de pico do vento sobre a fachada A ou B.

As distâncias da fachada envidraçada quando o vento actua perpendicularmente à fachada A ou B, são determinadas através da Figura B.2, de onde se obtêm os valores apresentados no Quadro F.6.

E	26,24
d-e	12,780
e/5	5,248
4/5e	20,992

Quadro B.9 - Distâncias correspondentes as zonas A, B e C da fachada envidraçada.

Os valores das pressões provocadas na fachada E, devido ao vento actuar sobre a fachada A ou B estão apresentados no quadro seguinte:

Zona A		Zona B		Zona C	
$C_{pe,2.5}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,2.5}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,2.5}$	$C_{pe,10}$
-1,32	-1,2	-0,98	-0,8	-0,5	-0,5
↓					
$w_{e,2.5}$ (kPa)	$w_{e,10}$ (kPa)	$w_{e,2.5}$ (kPa)	$w_{e,10}$ (kPa)	$w_{e,2.5}$ (kPa)	$w_{e,10}$ (kPa)
-1,40	-1,28	-1,04	-0,85	-0,53	-0,53

Quadro B.10 - Coeficientes de pressão exterior e pressões provocadas na fachada E.

Anexo C

Quantificação da tensão admissível segundo a Norma ENV 13474-1 [6]

Para a determinação da tensão admissível do vidro, já mencionada no Capítulo 3, são necessários os quadros a seguir apresentados.

Type of prestressed glass	Processed form	$F_{b,k}$ (N/mm ²)
Thermally toughened safety glass Heat soaked thermally toughened Safety glass	Float glass or drawn sheet glass	120
	Patterned glass	90
	Enamelled float glass or enamelled patterned glass	75
Heat strengthened glass	Float glass or drawn sheet glass	70
	Patterned glass	55
	Enamelled float glass or enamelled patterned glass	45
Chemically strengthened glass	Float glass or drawn sheet glass	150
	Patterned glass	150
Thermally toughened Borosilicate safety glass	Borosilicate glass	120
Heat strengthened borosilicate glass	Borosilicate glass	-----

Quadro C.1 - Valor característico da tensão de rotura para vidros

Pane área in m ²	k_A
0,2	0,93
0,5	0,97
1,0	1,00
2,0	1,03
5,0	1,07
10,0	1,10
20,0	1,13

Quadro C.2 - Factor de tamanho k_A

Duration of action	Loading example	K_{mod}
Short	Wind	0,72
	snow	0,36
Medium	Climate (for insulating glass units)	0,36
	Self-weight	0,27
Permanent	Altitude (for insulating glass units)	0,27

Quadro C.3 - Factor de modificação K_{mod}

Glass product	γ_m		γ_v		γ_v	
			Thermally toughened Heat soaked thermally Toughened Heat strengthened		chemically strengthened	
	Ultimate limite state	Servicea- bility limit state	Ultimate limite state	Servicea- bility limit state	Ultimate limite state	Servicea- bility limit state
Float glass	1,8	1,0	2,3	1,5	2,3	1,5
Drawn sheet glass	1,8	1,0	2,3	1,5	2,3	1,5
Enamelled float or drawn sheet	1,8	1,0	2,3	1,5	-----	-----
Patterned glass	2,3	1,3	3,0	2,0	3,0	2,0
Enamelled patterned	2,3	1,3	3,0	2,0	-----	-----
Polished wired glass	2,3	1,3	-----	-----	-----	-----
Patterned wired glass	3,2	1,8	-----	-----	-----	-----
Borosilicate glass	1,8	1,0	2,3	1,5	-----	-----
Glass ceramics	1,8	1,0	-----	-----	-----	-----

Quadro C.4 – coeficientes parciais γ_m e γ_v .

País	γ_n
Áustria	1,0
Bélgica	1,0
Dinamarca	1,0
Finlândia	1,0
França	1,0
Alemanha	1,0
Grécia	1,0
Islândia	1,0
Irlanda	1,0
Itália	1,0
Luxemburgo	1,0
Holanda	1,0
Noruega	1,0
Portugal	1,0
Espanha	1,0
Suécia	1,0
Suíça	1,0
Reino Unido	1,0

Quadro C.5 - Factor parcial nacional γ_n .

As tensões nos painéis de vidro devido às acções exercidas sobre estes, não podem exceder a tensão máxima admissível determinada de acordo com a norma EN 13474-1.

De seguida, será quantificada a tensão máxima admissível dos painéis de vidro temperado, que constituem a fachada em estudo, de acordo com o procedimento descrito no Capítulo 3.

- **Valor característico da tensão de rotura para vidros temperados, $f_{b,k}$**

Considerando que o tratamento térmico (têmpera) foi realizado a partir do vidro float, o valor característico da tensão de rotura é igual a 120 N/mm² (Quadro C.1).

- **Factores parciais, γ_M e γ_V**

Os factores γ_M e γ_V para o vidro float, relativo ao estado limite último, são iguais a 1,8 e 2,3, respectivamente (Quadro C.4).

- **Factor de modificação, k_{mod}**

O factor de modificação depende da duração da acção a que o vidro está sujeito. Pelo Quadro C.3, para acção de curta duração (vento), $k_{mod}=0,72$.

- **Factor que depende da área do vidro, k_A**

A área de cada painel é 1,18 x 2,13 = 2,51 m², logo pelo Quadro C.2, $k_A=2,51^{0,04}=1,04$.

- **Tensão máxima admissível**

E por fim, o cálculo da tensão resistente admissível de cada painel de vidro, de acordo com a Equação 3.6, mencionada no Capítulo 3.

$$f_{g;d} = \left(0,72 \times \frac{45}{1,8 \times 1,04} + \frac{120 - 45}{2,3} \right) \times 1,0 = 56400 \text{ kPa} = 56,4 \text{ MPa}$$

Anexo D

Carga resistente do vidro segundo ASTM E 1300 [11]

Os valores do coeficiente do tipo de vidro e da tensão resistente necessários para a determinação da carga resistente do vidro segundo a expressão apresentada no Capítulo 3 (Equação 3.4) estão demonstrados nos quadros seguintes de acordo com a norma ASTM E 1300 [11]

Tipo de vidro	Carga de curta duração	Carga de longa duração
Vidro recozido	1,0	0,5
Vidro termo-endurecido	2,0	1,3
Vidro temperado	4,0	3,0

Quadro D.1 – Coeficiente do tipo de vidro (GTF) para painel de vidro monolítico ou laminado.

	Vidro recozido	Vidro termo-endurecido	Vidro temperado
Afastado dos bordos	23,3	46,6	93,1
Corte limpo dos bordos	16,6	-	-
Bordos costurados	18,3	36,5	73,0
Bordos polidos	20,0	36,5	73,0

Quadro D.2 – Valor característico da tensão resistente para uma carga actuar durante 3 segundos.

Anexo E

Características do silicone de reticulação acética

Identificação do produto	
Consistência	Pasta tixotrópica
Cor	Transparente + 26 cores
Peso específico (g/cm ³)	1,03
Resíduo sólido seco (%)	100
Armazenagem	24 meses nos cartuchos originais selados num local seco e fresco (máx: + 26 °C)
Classificação de perigo de acordo com a Directiva CE 99/45	nenhuma
Classificação aduaneira	2214 90 00
Dados de aplicação a + 23 °C e 50% H.R	
Temperatura de aplicação permitidas	De + 5 °C a + 50 °C
Velocidade de extrusão do injectar 3,5 mm à pressão de 0,5 MPa (g/min)	120
Tempo de formação de película	10 minutos
Retracção durante a vulcanização (%)	3,5
Velocidade de vulcanização	4 mm em 1 dia 10 mm em 7 dias
Prestações finais	
Resistência à tracção de acordo com a DIN 53504 53A (N/mm ²)	1,6
Alongamento até à ruptura de acordo com DIN 53504 53A (%)	800
Resistência ao dileceramento (ASTM D 624, molde C) (N/mm ²)	8
Dureza shore A (DIN 53505)	20
Peso específico a 25 °C (DIN 53479) (g/cm ³)	1,02
Permeabilidade ao vapor de água (DIN 53122, folha de 2 mm)	23 g/m ² /dia
Módulo de alongamento medido de acordo com ISSO 8339 Método A (N/mm ²) - a 25% de alongamento - a 50% de alongamento - a 100% de alongamento	0,20 0,27 0,35
Movimento máximo de exercício permitido (%)	25
Resistência à água	Excelente
Resistência ao envelhecimento	Excelente
Resistência aos agentes atmosféricos	Excelente
Resistência aos agentes químicos, ácidos e alcali diluídos	Bom
Resistência ao sabão e detergentes	Excelente
Resistência aos solventes	Limitada
Resistência à temperatura	De -40 °C a +180 °C

Quadro E.1 - Dados técnicos de acordo com as normas BS 5889 Tipo B, ASTM C920, TT-S-00230C, TT-S-0015434, DIN 18540, T-2, CLASSE E [34].

Anexo F

Determinação da pré-tensão aplicar nos cabos horizontais

A fachada quando sujeita à acção do vento leva à compressão de alguns dos cabos horizontais de contraventamento. Esses cabos não resistem à compressão, por essa razão terá de ser aplicado uma pré-tensão, de modo a estes ficarem todos traccionados. Essa força é determinada pela Equação 5.1.

Devido à simetria da fachada, a análise foi realizada apenas para os primeiros 8 alinhamentos de cabos verticais.

Os esforços de compressão que se pretende anular estão apresentados no vector $\{F\}$.

$$\{F\} = \begin{bmatrix} 4 \\ 17 \\ 4 \\ 4 \\ 8 \\ 6 \\ 8 \\ 4 \\ 7 \\ 7 \\ 7 \\ 6 \\ 5 \\ 3 \\ 5 \\ 9 \end{bmatrix} \text{ (KN)}$$

De seguida, são expostas as matrizes de influência $[M]$ e o vector das forças de pré-tensão aplicar em cada cabo $\{C\}$.

- Para $6,0 \text{ m} \leq z \leq 10,7 \text{ m}$

$$[M] = \begin{bmatrix} 3.485 & -1.189 & 4.141 & 2.113 & 0.749 & 0.994 & 0.737 & 0.37 & 0.685 & 0.508 & 0.154 & 0.123 & 0.12 & 0.06 & 0.112 & 0.085 \\ -1.189 & 1.52 & -0.711 & -0.37 & -0.131 & -0.172 & -0.128 & -0.064 & -0.119 & -0.089 & -0.027 & -0.021 & -0.021 & -0.01 & -0.019 & -0.015 \\ 4.322 & -0.742 & 17.382 & 2.786 & 2.546 & 3.644 & 2.547 & 1.311 & 2.357 & 1.711 & 0.524 & 0.418 & 0.407 & 0.202 & 0.38 & 0.288 \\ 2.206 & -0.386 & 2.786 & 3.547 & 0.699 & 0.82 & 0.669 & 0.322 & 0.625 & 0.478 & 0.144 & 0.114 & 0.111 & 0.055 & 0.104 & 0.079 \\ 0.782 & -0.136 & 2.546 & 0.699 & 26.426 & 22.398 & 25.163 & 9.564 & 24.116 & 20.982 & 6.052 & 4.765 & 4.653 & 2.317 & 4.337 & 3.27 \\ 1.038 & -0.179 & 3.644 & 0.82 & 22.398 & 35.063 & 22.526 & 10.955 & 20.527 & 14.041 & 4.389 & 3.517 & 3.424 & 1.699 & 3.196 & 2.424 \\ 0.75 & -0.13 & 2.483 & 0.652 & 24.534 & 21.963 & 26.566 & -1.436 & 24.615 & 22.5 & 6.368 & 4.998 & 4.883 & 2.432 & 4.55 & 3.426 \\ 0.377 & -0.065 & 1.278 & 0.314 & 9.325 & 10.681 & -1.436 & 120.613 & 9.366 & 10.949 & 3.215 & 2.479 & 2.432 & 1.231 & 2.266 & 1.7 \\ 0.715 & -0.124 & 2.357 & 0.625 & 24.116 & 20.527 & 25.246 & 9.606 & 26.589 & 23.02 & 6.639 & 5.276 & 5.14 & 2.549 & 4.792 & 3.619 \\ 0.53 & -0.092 & 1.711 & 0.478 & 20.982 & 14.041 & 23.077 & 11.229 & 23.02 & 36.168 & 8.965 & 6.712 & 6.62 & 3.342 & 6.152 & 4.567 \\ 0.161 & -0.028 & 0.524 & 0.144 & 6.052 & 4.389 & 6.531 & 3.298 & 6.639 & 8.965 & 36.575 & 23.583 & 23.684 & 11.532 & 21.606 & 14.852 \\ 0.128 & -0.022 & 0.418 & 0.114 & 4.765 & 3.517 & 5.126 & 2.542 & 5.276 & 6.712 & 23.583 & 27.354 & 26.07 & 10.016 & 24.961 & 21.617 \\ 0.122 & -0.021 & 0.397 & 0.109 & 4.537 & 3.339 & 4.883 & 2.432 & 5.011 & 6.454 & 23.092 & 25.418 & 27.43 & -1.005 & 25.42 & 23.105 \\ 0.061 & -0.011 & 0.197 & 0.054 & 2.259 & 1.656 & 2.432 & 1.231 & 2.486 & 3.258 & 11.244 & 9.766 & -1.005 & 120.828 & 9.767 & 11.25 \\ 0.117 & -0.02 & 0.38 & 0.104 & 4.337 & 3.196 & 4.667 & 2.324 & 4.792 & 6.152 & 21.606 & 24.961 & 26.072 & 10.017 & 27.358 & 23.597 \\ 0.088 & -0.015 & 0.288 & 0.079 & 3.27 & 2.424 & 3.514 & 1.743 & 3.619 & 4.567 & 14.852 & 21.617 & 23.697 & 11.538 & 23.597 & 36.601 \end{bmatrix}$$

$$\{C\} = \begin{bmatrix} -992.31 \\ -1788.32 \\ 114.83 \\ 224.43 \\ 5.27 \\ 18.34 \\ -104.31 \\ -11.104 \\ 55.56 \\ 10.58 \\ -30.83 \\ -65.45 \\ 126.30 \\ 12.79 \\ -13.58 \\ -48.16 \end{bmatrix}$$

- Para $3,60 \text{ m} \leq z \leq 6,0 \text{ m}$

$$[M] = \begin{bmatrix} 30.411 & 36.086 & 21.65 & 30.303 & 9.232 & 11.316 & 8.756 & 4.974 & 8.034 & 5.934 & 3.479 & 2.877 & 2.717 & 1.793 & 2.525 & 1.919 \\ 36.086 & 86.779 & -5.069 & 44.749 & 3.126 & 3.114 & 2.756 & 3.227 & 2.759 & 2.393 & 1.496 & 1.295 & 1.216 & 1.118 & 1.18 & 0.983 \\ 22.598 & -5.291 & 48.469 & 17.148 & 15.175 & 19.403 & 14.616 & 6.807 & 13.196 & 9.402 & 5.428 & 4.438 & 4.196 & 2.485 & 3.856 & 2.852 \\ 31.63 & 46.709 & 17.148 & 35.476 & 8.57 & 10.299 & 8.074 & 4.874 & 7.451 & 5.58 & 3.285 & 2.727 & 2.573 & 1.753 & 2.401 & 1.839 \\ 9.637 & 3.263 & 15.175 & 8.57 & 21.635 & 20.681 & 20.243 & 8.307 & 19.159 & 17.163 & 8.7 & 7.035 & 6.694 & 3.553 & 6.106 & 4.459 \\ 11.812 & 3.25 & 19.403 & 10.299 & 20.681 & 29.073 & 20.364 & 9.386 & 18.208 & 12.297 & 6.683 & 5.492 & 5.202 & 3.08 & 4.793 & 3.58 \\ 8.911 & 2.805 & 14.251 & 7.872 & 19.737 & 19.855 & 21.45 & -1.775 & 19.464 & 18.523 & 9.263 & 7.448 & 7.095 & 3.575 & 6.441 & 4.652 \\ 5.062 & 3.284 & 6.637 & 4.753 & 8.099 & 9.151 & -1.775 & 108.81 & 7.99 & 8.622 & 4.383 & 3.709 & 3.515 & 2.827 & 3.362 & 2.73 \\ 8.385 & 2.88 & 13.196 & 7.451 & 19.159 & 18.208 & 19.964 & 8.195 & 21.094 & 19.091 & 9.78 & 7.924 & 7.535 & 3.812 & 6.848 & 4.968 \\ 6.194 & 2.498 & 9.402 & 5.58 & 17.163 & 12.297 & 18.998 & 8.843 & 19.091 & 26.405 & 12.007 & 9.455 & 9.066 & 4.333 & 8.19 & 5.835 \\ 3.631 & 1.561 & 5.428 & 3.285 & 8.7 & 6.683 & 9.5 & 4.495 & 9.78 & 12.007 & 25.96 & 18.238 & 18.006 & 8.372 & 16.086 & 10.784 \\ 3.003 & 1.352 & 4.438 & 2.727 & 7.035 & 5.492 & 7.639 & 3.804 & 7.924 & 9.455 & 18.238 & 19.725 & 18.407 & 7.477 & 17.508 & 15.998 \\ 2.765 & 1.237 & 4.091 & 2.509 & 6.527 & 5.072 & 7.095 & 3.515 & 7.347 & 8.84 & 17.555 & 17.947 & 19.731 & -2.55 & 17.921 & 17.445 \\ 1.825 & 1.138 & 2.423 & 1.709 & 3.464 & 3.003 & 3.575 & 2.827 & 3.716 & 4.225 & 8.163 & 7.29 & -2.55 & 108.317 & 7.266 & 8.06 \\ 2.636 & 1.232 & 3.856 & 2.401 & 6.106 & 4.793 & 6.607 & 3.448 & 6.848 & 8.19 & 16.086 & 17.508 & 18.381 & 7.453 & 19.672 & 18.096 \\ 2.003 & 1.026 & 2.852 & 1.839 & 4.459 & 3.58 & 4.771 & 2.8 & 4.968 & 5.835 & 10.784 & 15.998 & 17.892 & 8.267 & 18.096 & 25.729 \end{bmatrix}$$

$$\{C\} = \begin{bmatrix} 63.75 \\ -151.57 \\ -111.88 \\ 195.03 \\ -5.85 \\ 59.23 \\ -182.84 \\ -18.89 \\ 60.93 \\ 48.34 \\ -99.55 \\ -72.00 \\ 267.12 \\ 27.29 \\ -10.10 \\ -130.36 \end{bmatrix}$$

- Para $0 \text{ m} \leq z \leq 3,60 \text{ m}$

$$[M] = \begin{bmatrix} 30.762 & 36.542 & 21.908 & 30.671 & 9.448 & 11.503 & 8.97 & 5.246 & 8.268 & 6.197 & 3.631 & 2.974 & 2.788 & 1.949 & 2.59 & 1.927 \\ 36.542 & 87.96 & -5.247 & 45.324 & 3.134 & 3.006 & 2.776 & 3.447 & 2.832 & 2.576 & 1.621 & 1.358 & 1.255 & 1.2 & 1.205 & 0.944 \\ 22.868 & -5.477 & 49.134 & 17.343 & 15.59 & 19.866 & 15.016 & 7.139 & 13.588 & 9.749 & 5.612 & 4.57 & 4.3 & 2.715 & 3.96 & 2.902 \\ 32.014 & 47.309 & 17.343 & 35.896 & 8.758 & 10.442 & 8.263 & 5.149 & 7.668 & 5.841 & 3.439 & 2.822 & 2.642 & 1.902 & 2.462 & 1.839 \\ 9.862 & 3.271 & 15.59 & 8.758 & 22.054 & 21.11 & 20.658 & 8.641 & 19.575 & 17.568 & 8.937 & 7.216 & 6.844 & 3.821 & 6.256 & 4.55 \\ 12.007 & 3.138 & 19.866 & 10.442 & 21.11 & 29.561 & 20.772 & 9.723 & 18.603 & 12.633 & 6.914 & 5.652 & 5.327 & 3.318 & 4.912 & 3.626 \\ 9.129 & 2.825 & 14.641 & 8.057 & 20.141 & 20.253 & 21.857 & -1.475 & 19.875 & 18.938 & 9.483 & 7.625 & 7.247 & 3.845 & 6.598 & 4.764 \\ 5.339 & 3.508 & 6.961 & 5.02 & 8.425 & 9.48 & -1.475 & 109.31 & 8.315 & 8.946 & 4.681 & 3.886 & 3.644 & 3.024 & 3.463 & 2.706 \\ 8.63 & 2.956 & 13.588 & 7.668 & 19.575 & 18.603 & 20.384 & 8.528 & 21.526 & 19.54 & 10.019 & 8.116 & 7.7 & 4.097 & 7.017 & 5.087 \\ 6.468 & 2.689 & 9.749 & 5.841 & 17.568 & 12.633 & 19.423 & 9.175 & 19.54 & 26.921 & 12.258 & 9.669 & 9.256 & 4.651 & 8.391 & 5.997 \\ 3.79 & 1.692 & 5.612 & 3.439 & 8.937 & 6.914 & 9.726 & 4.801 & 10.019 & 12.258 & 26.514 & 18.643 & 18.349 & 8.747 & 16.395 & 10.933 \\ 3.104 & 1.417 & 4.57 & 2.822 & 7.216 & 5.652 & 7.82 & 3.986 & 8.116 & 9.669 & 18.643 & 20.147 & 18.843 & 7.666 & 17.941 & 16.429 \\ 2.837 & 1.277 & 2.576 & 2.576 & 6.673 & 5.194 & 7.247 & 3.644 & 7.507 & 9.025 & 17.89 & 18.372 & 20.23 & -2.747 & 18.403 & 17.992 \\ 1.984 & 1.221 & 2.647 & 1.855 & 3.726 & 3.235 & 3.845 & 3.024 & 3.995 & 4.534 & 8.528 & 7.474 & -2.747 & 112.031 & 7.35 & 7.997 \\ 2.704 & 1.258 & 3.96 & 2.462 & 6.256 & 4.912 & 6.767 & 3.552 & 6.256 & 8.391 & 16.395 & 17.941 & 18.875 & 7.539 & 20.185 & 18.712 \\ 2.011 & 0.986 & 2.902 & 1.839 & 4.55 & 3.626 & 4.886 & 2.776 & 5.087 & 5.997 & 10.933 & 16.429 & 18.453 & 8.202 & 18.712 & 26.607 \end{bmatrix}$$

$$\{C\} = \begin{bmatrix} 64.06 \\ -151.41 \\ -111.94 \\ 194.82 \\ -5.97 \\ 58.84 \\ -182.35 \\ -18.79 \\ 61.91 \\ 48.85 \\ -25.25 \\ 22.47 \\ -70.68 \\ -6.00 \\ 110.14 \\ -58.80 \end{bmatrix}$$

